

Doktori (Ph.D.) értekezés

Talajszuszpenziók reológiai vizsgálata

Czibulya Zsuzsanna

Témavezető: Dr. Tombácz Etelka
egyetemi tanár, a MTA doktora

Környezettudományi doktori iskola,
Kolloidkémiai Tanszék, SZTE-TTIK
Szeged

2009.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	4
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	6
2.1. A talaj felépítése	6
2.2. Határfelületi folyamatok	10
2.3. A talaj szerkezete	11
2.4. A vizsgált talajjavítási módszerek	14
2.5. A talajok vizsgálata	16
2.5.1. Talajtani vizsgálatok	17
2.6. Reológia	20
2.6.1. A talajszuszpenziók reológiája	22
3. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK	25
3.1. Kísérleti anyagok	25
3.1.1. Mezőgazdasági hatásokat modellező és különböző növényi borítottságú területek	26
3.1.2. Remediációs kísérleti parcellák	30
3.2. Módszerek	33
3.2.1. Talajszuszpenziók összehasonlítható állapotban meghatározott víztartalmának meghatározása	33
3.2.2. Arany-féle kötöttségi szám meghatározása	35
3.2.3. Talajszuszpenziók vizsgálata laboratóriumi és terepi körülmények között	36
3.2.4. Rediszpergálhatóság vizsgálata	40
4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK	41
4.1. Előkísérletek, mérési körülmények kidolgozása, a mérést befolyásoló tényezők	41
4.1.1. Szemcseméret hatása a reológiai paraméterekre	41
4.1.2. A hőmérséklet hatása a reológiai tulajdonságokra	45
4.1.3. Az állási idő hatása a reológiai tulajdonságokra	46
4.1.4. Koncentrációfüggés, szuszpenziók víztartalmának hatása a reológiai tulajdonságokra	47
4.1.5. Mérhető koncentráció-tartomány kiválasztása	50
4.1.5.1. Azonos víztartalmú szuszpenziók	50
4.1.5.2. Összehasonlítható állapotú szuszpenziók, mérhető koncentrációtartomány	57
4.2. Egyensúlyi üledék készítése	58
4.2.1. Az egyensúlyi üledékek víztartalma, WCSSinCS, mint talajminősítő paraméter	58
4.3. A talajok jellemzése egyszerű módszerek segítségével	61

4.3.1. Rediszpergálhatósági vizsgálatok	61
4.3.2. Arany-féle kötöttségi szám meghatározása	62
4.3.3. Kohéziós erő összevetése az abszolút folyáshatárral	63
4.4. Egyensúlyi üledékek vizsgálata	64
4.4.1. Egyensúlyi üledékek minősítése víztartalmuk által	64
4.4.1. Folyás típusa	67
4.4.2. A reológiai paraméterek összehasonlítása a víztartalommal	68
4.5. Eredmények értékelése művelési vagy talajjavítási kísérletek mintázási helyei szerint csoportosítva	69
4.5.1. Mezőgazdasági tevékenység hatásának vizsgálata, Németországból származó Puch talajminták szuszpenzióinak paraméterein keresztül	69
4.5.1.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján	69
4.5.1.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata	70
4.5.2. Biológiai és hagyományos mezőgazdálkodás hatásának vizsgálata Olaszországban	73
4.5.2.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján	74
4.5.2.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata	75
4.5.3. Növényi borítottság hatásának vizsgálata a spanyolországi Santomera katénában	78
4.5.3.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján	79
4.5.3.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata	80
4.5.4. Bioremediáció a Santomera katéna „miniparcelláin” (Tres Caminos)	83
4.5.4.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján	84
4.5.4.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata	85
4.5.5. Szennyvíziszap adagolás hatásának vizsgálata a spanyol Abanilla katéna mintáin	88
4.5.5.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján	89
4.5.5.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata	90
4.5.6. El Aguilucho katéna, újraerdősítési remediációs kísérlet eredményei, teraszos művelés hatásának vizsgálata	92
4.5.6.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján	93
4.5.6.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata	94
5. ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS	98
6. SUMMARY	103
REFERENCES	108

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

A talaj háromfázisú pórusrendszer, szilárd, gáz és folyadék fázis alkotja. Olyan dinamikai rendszer, mely az exogén hatásokkal szemben egyensúlyra törekszik. A pedoszféra (talajtakaró) a litosféra (kőzetburok) legkülső termékeny mállott rétege, eltér a talajképző közettől. Legfontosabb tulajdonsága a termékenység, vagyis, hogy a növények számára a kellő időpontban és mennyiségben tápanyagot és nedvességet szolgáltat, illetve a táplálékláncon keresztül az állatok és végül az emberek számára is. A talaj termőképességét befolyásolja a talaj minősége, összetétele, vízkapacitása, porozitása, szerkezeti tulajdonságai. A talaj az egyik legfontosabb természeti erőforrás, melyet meg kell őrizni az utókor számára, és ha lehetséges javítani kell a minőségét és termőképességét. Természetes körülmények közt a talaj képes fenntartani az egyensúlyt a talaj genetikai tulajdonságai és azokat hasznosító növényzet közt. Ez az egyensúly igen törékeny, az emberi beavatkozás, mint a mezőgazdaság, könnyen megbonthatja.

Manapság világszerte fokozódó probléma a talajok degradációja, és a sivatagos területek kialakulása, így e folyamatok időben való előrejelzése is egyre fontosabbá válik. Munkám egy EU6-os projekt (INDEX – Indicators and thresholds for desertification, soil quality, and remediation, GOCE-CT-2003-505450) része, mely a talajdegradációt előrejelző paraméterek meghatározásával, a növények gyérülését megelőző állapot fizikai, kémiai, biokémiai és molekuláris biológiai jellemzőinek kutatásával, azonosításával foglalkozott. A talajszerkezet jellemzésére a reológia módszerét kívántam alkalmazni, mivel ezt a módszert korábban többnyire agyagásványszuszpenziók folyási tulajdonságainak vizsgálatára használták. Ghezzehei és Or a talajszuszpenziók oszcillációs mérésein keresztül vizsgálták traktorok mozgásainak hatását a talajok szerkezetére. Sajnálatos módon egyik esetben sem vették figyelembe a talajszuszpenziók víztartalmának hatását, és nem említették a szuszpenziók által mutatott tixotrópiát sem. (Markgraf és társai 2006., Ghezzehei és Or 2001., Or és Ghezzehei, 2002; Ghezzehei és Or, 2003; Bongiovanni és Lobartini, 2006; Bronic és Lal, 2005; Lipiec és Hatano, 2003; Johnston és Tombácz, 2002.) A talajok szerkezeti szilárdságára ezek a mérések nem adnak információt. Létezik egy terepi mérési módszer mely segítségével a helyszínen adhatunk egy durva becslést a nedves talajok fizikai térhálójának erősségére, kohéziójának mértékére. Tehát a talajok nyírással szembeni ellenállását e terepi mérések segítségével is jellemezhetjük, a kohéziós erőket meghatározva. (Eijelkamp kohéziómérő, ASTM Standard, D 2573-94.) Hiányzik azonban a terepi méréseket validáló, a

meghatározott értékek korrekt laborvizsgálatok eredményeivel való összevetése, ami által az egyes talajok szerkezeti szilárdsága számszerűsíthető, összehasonlítható lenne. Tekintettel arra, hogy a reológiai mérések menete talajszuszpenziók esetén nem kidolgozott, munkám elsődleges célja a talajszuszpenziók reológiai vizsgálatának metodikai kidolgozása volt. Feladatom volt a talajok fizikai tulajdonságainak vizsgálata, a talajszuszpenziók reológiai paramétereinek meghatározása folyásgörbék kiértékelése alapján, valamint a szuszpenziók abszolút folyáshatárának mérése. Mivel a projekt talajmintáit a résztvevő kutatócsoportok széleskörűen jellemezték és az adatbázis rendelkezésemre állt, eredményeimet a meghatározott talajparaméterek ismeretében értékelhettem, a reológiai jellemzőket összehasonlíthattam az adatbázisban található paraméterekkel. (www.soil-index.com) Elsősorban a reológiai paraméterek talajszerkezet jellemzésére, illetve a talajszerkezet minőségváltozásának követésére való alkalmazhatóságát vizsgáltam.

Sajnálatos módon az irodalmi áttekintésben taglalt tanulmányok közt, nincs egyetlen olyan módszer sem, amely a nem szakértők számára adna információt a talaj minőségéről, valamint, amely az összes többi talajparaméterrel összefüggésben állna. Mivel a reológiai mérések a módszerben való jártasságot igényelnek, további célként tűztem ki a reológiai paraméterek meghatározását helyettesítő, nem szakértők számára is könnyen alkalmazható módszerek keresését, illetve az így kapott eredmények és a reológiai paraméterek egymáshoz való viszonyának vizsgálatát. Céлом egy olyan talajdegradációt előre jelző indikátor kifejlesztése volt, melyet nemcsak a kutatók képesek használni. Ezért miután kidolgoztam a talajszuszpenziók reológiai mérési módszerét, a meghatározott reológiai paraméterekkel és az összehasonlítható állapotú talajszuszpenziók víztartalmával (WCSSinCS értékekkel) jellemeztem az egyes területek talajainak minőségét, szerkezetét, valamint az egyes területek, katénák remediációs kísérleti parcellák talajai közti különbséget, további célom volt a reológiai paraméterek, WCSSinCS értékek és az egyszerűen meghatározható talajvizsgálati módszerek eredményeinek (Arany-féle kötöttségi szám, rediszpergálhatóság, kohéziós erő) összevetése, indikátorként való alkalmazhatóságuk bizonyítása.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A talaj felépítése

A talaj biotikus és abiotikus háromfázisú pórusrendszer, szilárd, gáz és folyadék fázis alkotja. Olyan dinamikai rendszer, mely az exogén hatásokkal szemben egyensúlyra törekszik. A pedoszféra (talajtakaró) a litoszféra (kőzetburok) legkülső termékeny mállott rétege, eltér a talajképző kőzettől. Legfontosabb tulajdonsága a termékenység, vagyis, hogy a növények számára a kellő időpontban és mennyiségben tápanyagot és nedvességet szolgáltat. (Keveiné 1998.)

A talaj gáz fázisa, a talajlevegő egyensúlyban van az atmoszférában lévő levegővel, de más az összetétele. A pontos összetétel talajonként más-más lehet. Mivel a talajlevegő összetételét a talajbiológiai folyamatok jellege és intenzitása, a talaj és a légkör közötti gázcsere sebessége, valamint a légnemű és a folyékony fázis közti kölcsönhatások befolyásolják; jelentősen eltér az atmoszférában lévő levegőétől. A talajlevegő oxigéntartalma kisebb, mint 21 százalék. A széndioxid térfogategységre jutó mennyisége, pedig többnyire tízszerese-százszorosa a légköri értéknek. Ezt leginkább a szerves anyagok mikrobiológiai bomlása és a gyökérlégzés okozza. A talajlevegő páratartalma is eltér a levegőétől. A gázfázis térfogata és összetétele a növényzet fejlettségi állapotától, az évszaktól függően egy-egy talajnál jelentősen változhat. A talaj légnemű fázisának mennyisége és összetétele befolyásolja a gyökérlégzést, a mikroorganizmusok tevékenységét, az egyes biológiai és kémiai folyamatok menetét. A talajlevegő a talajvizet kiszorítja, a pórusok egy részét tölti ki, mennyisége a talaj szövetének (különböző szemcsék milyen tömegarányban fordulnak elő a talajban), szerkezetének függvénye. (Keveiné 1998.) A talaj szerkezete és szövete jelentősen befolyásolja a talajban levő víz folyását, valamint a vízmegtartóképességet, és a víz tárolhatóságát. (Bronic és Lal 2005.)

A talaj folyadék fázisa tartalmazza a csapadék útján az atmoszférából beoldódott vegyületeket (például kén vegyületek, CO_2), illetve a talajban található oldható sókat. A talajoldat összetétele folytonosan változik a talajban lejátszódó folyamatok hatására (le- és felfelé irányuló vízmozgások, oldódás, telítette válás, kicsapódás), függ az ásványi összetételtől, (hiszen az egyes ásványok: pl. karbonátok, oxidok oldódnak) és szervesanyag-, főleg humuszanyag-tartalomtól (komplekképzés, oldódás elősegítés). A talaj folyékony fázisa hidratált szabad ionokat, ionasszociátumokat, oldható szerves vegyületeket, fémkomplexeket,

illetve semleges molekulákat (pl. abszorbeált gázokat) tartalmazó elektrolitoldat. Általában a Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ kationok és a HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} anionok a leggyakoribbak. Esetenként az NH_4^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} illetve a SiO_3^{2-} , AlO_3^{3-} , NO_3^- ionok is nagyobb mennyiségben találhatók benne. Például szikesek esetén igen magas a Na^+ -tartalom. Természetesen a folyadék fázis iontartalma erőteljesen függ a pH-tól. (Filep 1989.)

A talaj szilárd fázisa egyaránt tartalmaz szervesetlen (ásványi) és szerves anyagokat. A talaj ásványi anyagai csoportosíthatóak amorf és kristályos anyagként. Ismeretük azért fontos, mert megszabják a talajban található anyag fizikai és kémiai viselkedését. A talajban található kristályos ásványok a következőképpen csoportosíthatóak: szilikátok, oxidok, karbonátok, kloridok, szulfidok, szulfátok, foszfátok. (Filep 1989., Stefanovits 1975.)

A talajban megtalálható Fe^{3+} , Al^{3+} és Ca^{2+} ionok kötőanyagként szolgálnak az egyedülálló részecskék közt, mivel e kationok hídként működnek az agyagásványok és a talaj szerves anyaga között. Az oldott szerves anyag komplexet alkothat a Fe^{3+} illetve Al^{3+} ionokkal, melyek alacsony pH-n kioldódnak, a talajoldattal elmozdulnak és a talaj más részén precipitálódhatnak. (Bronic és Lal 2005.) Ha megfelelő mennyiségű Ca^{2+} -ion és ezzel arányosan megfelelő mennyiségű szervesanyag található a talajban, a talaj szerkezete erős, éppen ezért a talaj szervesanyag adagolással való javítása csak megfelelő Ca^{2+} -ion-szervesanyag arány mellett lehetséges. Amennyiben túladagoljuk a szervesanyagot, az a talaj elfolyósodását idézi elő. (Majzik és társai 2007. b.)

A talajban található oxidok, hidroxidok igen sok ásványi formában, igen nagy mennyiségben fordulnak elő. (Filep 1989.) Az oxidok oldhatósága és felületi töltés állapota pH-függő. A felület elektromosan semleges állapota, a zérustöltés pontja (Filep 1989., point of zero charge PZC), alatta illetve felette a felületi aktív helyek (S-OH) protonált illetve deprotonált formában vannak jelen. (Tombácz 2002., 2003.)

Az alumínium oxidjai, hidroxidjai:

- a gibbsit $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ szerkezetű, a gibbsit központi Al-ja körül 6 OH helyezkedik el, az oktaéder csúcsainak megfelelő elrendeződésben, a bayerit ehhez hasonló,
- a böhmít $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ szerkezetű, a trópusi talajokra jellemző,
- a diaszpor $\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ forma, mely hazánkban a bauxitos területek vörös agyagjaiban, és az ezen kialakult talajban fordul elő. Ezek a formák egymásba átalakulhatnak.

Talajokban a vas oxidjai, hidroxidjai általában gyakoribbak, mint az alumínium ilyen típusú vegyületei:

- a goethit $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ sárgásbarna, a mérsékelt öv talajaiban gyakori,

- a lepidokrit $\gamma\text{-FeO(OH)}$ narancsszínű, a pangóvizes erdőtalajokban jellemző,
- a hematit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ vörös, elsősorban melegebb éghajlaton képződött talajokra jellemző, de lúgos közegben inkább a goethit jellemző,
- a maghemit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ vöröses barna, mágneses, láptalajok égetésekor képződik,
- a magnetit (Fe_3O_4) pedig olyan vasoxid, melyben a vas egy része kétértékű más része háromértékű, a színe barnás fekete, és erősen mágneses.

Az agyagásványok rácstípusuk szerint rétegszilikátok SiO_4 -tetraéder rétegekből (T), AlO(OH) -oktaéder rétegekből (O) épülnek fel. Csoportosíthatóak kétrétegű (TO), háromrétegű (TOT), négyrétegű (TOT+O) amorf és átmeneti és vegyes rácsú ásványokként. A kétrétegűek közé tartoznak a kaolinit és a halloysit. Háromrétegű az illit, vermikulit és a szmektit (pl. montmorillonit) csoport. A négyrétegű agyagásványok a kloritok. Az allofánok nem rendelkeznek szabályos kristályráccsal. A TOT szerkezetűeknél megkülönböztetünk duzzadó és nem duzzadó agyagásványokat. (Oades 1990., Stefanovits 1975.) Duzzadó például a szmektit, nem duzzadó az illit.

Az agyagásványok Al^{3+} -helyei Fe^{2+} -al és Mg^{2+} -al, a Si^{4+} -helyek, pedig Al^{3+} -al helyettesíthetőek, negatív töltés defektek alakulhatnak ki a rétegrácson belül, amelyet a rétegek közötti terekben cserélhető kationok semlegesítenek. A főként Ca^{2+} - és Na^{+} - ionok közt ioncsere játszódhat le. (Stefanovits 1975.) A legnagyobb ioncserélő képességű agyagásvány a montmorillonit, melyben a hármás rétegrácsok töltése cserélhető kationokkal van kiegyenlítve, és a rétegek közti térben a hidratált cserélhető kationokon kívül vizet és egyéb molekulákat is tartalmaz. (Tombácz és társai 2004.) A hármásrétegek távolsága növekedhet: a szárazon összetapadt rétegek krisztallitjain belüli duzzadás következik be. (Szántó 1986.) A Na^{+} -ion tartalom a talaj szerkezetének romlásához vezet, mert az aggregátumok szétesését okozza. A talajok agyagásványtartalma befolyásolja a fajlagos felület nagyságát, a kationcsere-kapacitást, a töltés sűrűséget, a diszperzitásfokot, az expandálhatóságot és végül a talaj szerves széntartalmának dekompozíciós arányát, így a szemcsék összetapadását, mikro- és makroaggregációját is. (Bronic és Lal 2005.)

A talajban sokféle, alapvetően élő és holt szervesanyag található. Az élő szerves anyag a talajban élő mikro- és makroszervezetek testének anyaga. Mennyisége a talaj szerves anyag tartalmának 10-15 százaléka is lehet. A nem élő szervesanyagok egy része ismert szerkezetű vegyület, a másik részük bomlástermékek átalakulása és összekapcsolása révén képződött specifikus szervesanyag, a humuszanyag. A holt szervesanyag egyrészt a talajon élő növények maradványainak többé-kevésbé elbomlott anyagából, másrészt a mikrobiológiai

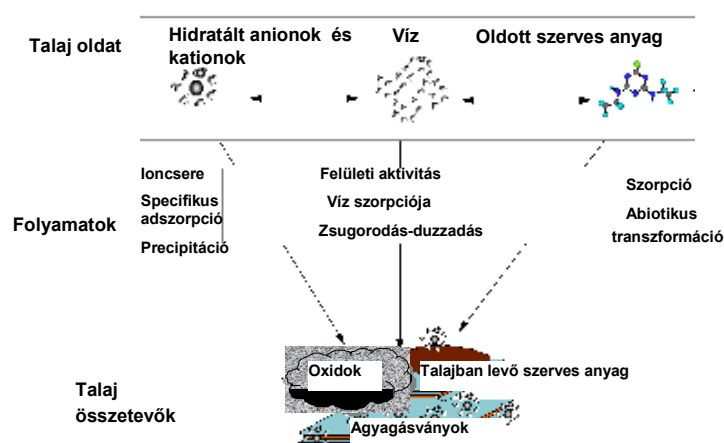
bontás útján átalakult valamint újraképződött szerves anyagból áll. (Filep 1988.) A szerves anyag a talajra jellemző, és mind mennyisége, mind minősége igen nagy szerepet játszik a talaj termékenységének kialakításában.

A talaj szerves anyagait csoportosíthatjuk humusz és nem humusz anyagokként. A nem humusz anyagok közé a fehérjék, az aminosavak, a szénhidrátok, a lignin, a növényi és állati maradványok tartoznak. A környezeti rendszerekben igen elterjedt, a nemcsak a talajokban előforduló humuszanyagok kémiaiilag nem azonosítható, tulajdonságaikban hasonló nagymolekulájú, nanorészecskés (Tombác 1998.) vegyületek keverékei, csak műveleti definícióval adhatók meg. (Tombác 2002.) Oldhatóság alapján megkülönböztetik a fulvosavakat, a huminsavakat és a huminanyagokat. (Stefanovits 1975.) A fulvosavak azok a humuszanyagok, melyek a talaj szerves anyagából 0.5%-os NaOH-al kioldhatók, és az így nyert oldat megsavanyítása után is oldatban maradnak. Kis molekulású vegyületek, vízben oldhatóak. Redukálóképességük a vas és az alumínium talajban való mozgásában játszik szerepet. A huminsavak azok a humuszanyagok, melyek a talaj szerves anyagából 0,5%-os NaOH-al kioldhatók, de az oldat megsavanyításakor kicsapódnak. A huminsavak a talajban lehetnek szabad állapotban, vagy Na^+ -, Ca^{2+} -, Mg^{2+} -, Fe^{3+} -, Al^{3+} -ionokhoz kötve. Nagy molekulású vegyületek, savanyú jellegük a karboxil- és a fenolos hidroxilgyököktől származik. Oldhatóságuk különböző, oldás előtt savas kezelés szükséges. A huminsavakat tovább csoportosíthatjuk, az alapján, hogy a savas kicsapás után alkoholban oldódnak-e, vagy sem. A humin és a humuszszen hideg, híg lúgos oldással nem oldhatók ki a talajból, a humin forró lúgban kioldódik. (Stefanovits 1975.)

A talajban mind a szerves, mind az ásványi anyagok egy része, mérete alapján a kolloidokhoz (Hunter 1989.) tartozik. Ezek határozzák meg dominánsan a talajokban történő fizikai, kémiai tulajdonságokat, hiszen igen nagy a felületük. Az agyagásványok az ásványszemcsék mikrométer nagyságrendbe eső méretük alapján sorolhatóak a kolloidok közé. (Stefanovits 1975.) A humuszanyagok molekuláik mérete miatt kolloid oldatokat alkotnak. A valódi talajszemcsék többnyire humuszcseppel fedett ásványi részecskék. A talaj részecskéi mindig különböző méretűek, tehát polidiszperz rendszer alakul ki. A talajokra jellemzőek a kolloid rendszerekben lejátszódó határfelületi jelenségek, mint például az ioncsere, az adszorpció, a felületi töltést létrehozó protolitikus folyamatok. (Johnston és Tombác 2002.)

2.2. Határfelületi folyamatok

A talajban található szilárd/folyadék, szilárd/gáz, folyadék/gáz határfelületek közül a szilárd részecskék és a talajoldat közötti a legfontosabb. A talajoldat egyensúlyai és a talajszemcsék határfelületén lejátszódó folyamatok láthatóak az 1. ábrán. (Johnston és Tombácz 2002.) A szilárd/folyadék határfelület azért fontos, mert az anyagok transzformációját, transzportját kontrolálja. Befolyásolja a talaj nedvességtartalmának minőségét, és a talajok hidraulikus konduktivitását. A víz kölcsönhatása a talaj ásványi részeivel meghatározza a talaj fizikai, kémiai tulajdonságait. A talajban levő oldott anyag lehet pozitív, vagy negatív töltésű, vagy semleges. Méretüktől és polaritásuktól függően ezen anyagok sorsa, transzportja erőteljesen függ a szilárd/folyadék határfelülettől.



1. ábra A határfelületen végbemenő folyamatok

A talajok szilárd fázisa humuszanyagokkal in situ felületmódosított ásványi halmaz, a szilárd/folyadék határfelületi tulajdonságokat a főleg agyagásvány és oxid részecskék felületén az oldódási-kicsapódási folyamatokban kialakuló szervesetlen (elsősorban Fe- és Al-oxi-hidroxidok) és a szerves (humusz) fedések határozzák meg. (Tombácz és 1996., Tombácz és társai 1998.) A humuszanyagok a talajok különböző ásványi részecskéinek felületén többnyire (Tombácz és társai 2004., Majzik és Tombácz 2007. a.)

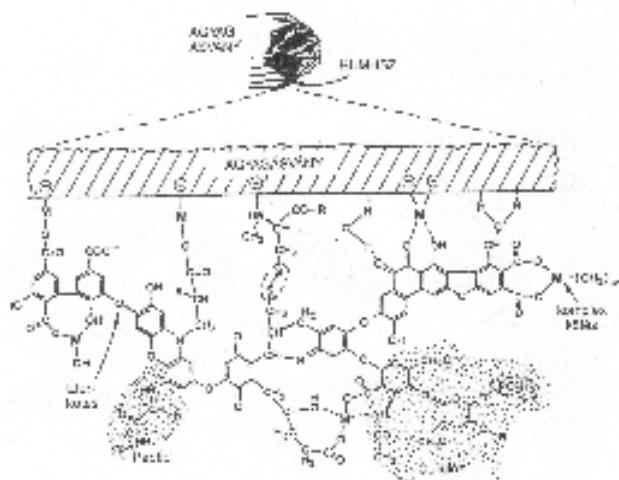
- felületi komplexképződéssel (pl. Al-szilikátok és agyagásványok élein lévő és terminális Al-OH helyeken, amorf és kristályos Fe- és Al-oxidok, hidroxidok Fe-OH és Al-OH helyein ligandum-csere reakcióval a felületi Fe- és Al-ionokat közvetlenül koordinálva),
- fém-hidakon keresztül (leggyakrabban Ca-hidakkal) és
- másodlagos kötőerőkkel (pl. H-híd, van der Waals kölcsönhatások) kötődnek.

Térszerkezeti okokból a humusz molekulák savas funkciós csoportjainak csak egy része képes a felülethez kötődni. A talajoldatokban közönséges pH-kon (5-7) a nem kötött karboxilcsoportok részben disszociált állapotúak (-COO^-), így a humusz polianionokkal fedett ásványi szemcsék a felületükön lévő változatos reaktív molekularészek (O- és N-tartalmú funkciós csoportok, alifás és aromás hidrofób régiók) mellett negatív töltések hordozóivá is válnak. (Johnston és Tombácz 2002.)

2.3. A talaj szerkezete

A talaj szerkezetének kialakulásáért a talaj ásványi összetétele, a mállás során képződött részecskék mérete és alakja felelős. A talaj szilárd fázisa sokféle méretű, alakú és minőségű alkotórészből áll. A 2 mm-nél nagyobb átmérőjű ásvány vagy közettörmelék kő illetve kavics, a 2-0,2 mm közötti frakciót durva homok, a 0,2-0,02 mm átmérőjű részecskéket finom homok, a 0,02-0,002 mm közöttieket por, a 0,002 mm alattiakat agyagfrakciónak nevezzük (Atterberg-féle skála).

A talaj szerkezetét (2. ábra) jelentősen befolyásolja a szerves-ásványi kötések erőssége, e kötések jelenléte jelentősen növeli a talaj szerkezetének tartósságát, és javítja a talaj szerkezetének tulajdonságait. A talaj szerves és szervetlen alkotórészei közti kapcsolat lehet a szerves anionok és kationoknak megkötődése az ásványi felületeken vagy szerves anionok megkötődése többértékű kationok által alkotott hidakon keresztül. Hidrogénhidakon keresztül való kötődés megvalósulhat az agyagásványokban levő oxigén atomokhoz, a van der Waals erővel való kötődés, pedig észterkötés a savjellegű szerves anyag és az agyagásványok, valamint a savanyú Si-OH csoportok és szerves alkoholok között. Ezek a szerves anyag egy részéhez való nehezebb hozzáférést eredményezik a mikroorganizmusok számára, így a humuszanyagok ásványosodása csökken. (Kaiser és Guggenberger 2000.)



2. ábra A talaj szerkezete sematikusán

A talaj szerkezetét a következő három szempont szerint ítélik meg (Stefanovits 1975.)

- a szerkezeti elemek alakja és mérete (morfológiai szerkezet),
- a különböző méretű szerkezeti elemek mennyisége és aránya (agronómiai szerkezet),
- a szerkezeti elemek vízállósága.

A morfológiai szerkezetet a talajszelvény helyszíni leírása alapján, a talajszelvényt rétegekre bontva bírálják el. Három kategóriát különböztetnek meg, egyedi, törési és aggregát szerkezetet. Az egyedi szerkezet az elsődleges részecskék laza illeszkedéséből alakul ki, a részecskék közt nincs kötőanyag. Szárazon az ilyen talaj pereg, míg nedvesen átfolyik az ujjak közt (pl. homokos és poros szerkezetű talaj). A törési szerkezet esetében az elsődleges részecskéket kolloidok ragasztják össze. A talaj csak nagyobb nyomásra esik szét, akkor is csak a törés által meghatározott elemekre. Ezeket a talajokat nevezzük tömöttek. Aggregátszerkezet esetében a talaj ismétlődő száradása, nedvesedése vagy biológiai tevékenység hatására jellegzetes szerkezeti elemek alakulnak ki. Ezek már kisebb nyomásra is elválnak, de az egyes szerkezeti elemek önmagukban még nagyobb nyomásnak is ellenállnak. Ezek az úgynevezett szerkezetes talajok, osztályozhatóak, gyengén, közepesen és erősen szerkezetes talajokként. Az elvált szerkezeti elemeket alakjuk, formájuknak a tér három irányában mutatott fejlődése alapján még további osztályokba sorolják.

Az agronómiai szerkezet megítélésakor kizárólag a szemcsék méretét veszik figyelembe, amit szitasorozat segítségével határoznak meg. A 10 mm-nél nagyobb aggregátumokat rögöknek, a 10-0,25 mm közötti frakciót morzsáknak, míg az ennél

apróbbakat pornak nevezzük. Agronómiai szempontból a 3-1 mm közötti átmérővel rendelkező morzsa a legelőnyösebb, az ez alatti szemcséket apró morzsának nevezzük. Ideális szerkezetű a talaj, ha legalább 80 százaléka morzsafrakcióba tartozó aggregátumot képez. Magyarországon például maximum 70 százalék ennek a frakciónak az aránya. (Stefanovits 1975.)

A talaj szerkezeti elemeinek minőségét a vízzel szemben mutatott viselkedés szabja meg. Ha a szerkezeti elemek vízben könnyen szétáznak, akkor esőzés hatására a talaj szerkezetessége megszűnik, vagy leromlik. Ha viszont a vízben áztatott szerkezeti elemek nagy része megmarad, a talajszerkezetet vízállóknak nevezzük. A vízállóságot nedves szitálással (szitáláskor függőlegesen mozgó szitákra helyezett talaj mozog az álló vízben), vagy a Viljamsz-Fagyajev-féle eljárással (az álló sziták között mozog a víz) határozhatjuk meg. (Stefanovits 1975.)

A talajok esetében megkülönböztetünk primer, szekunder és terciér szerkezetet. Az elsődleges szerkezetet az organo-minerális komplexek, a szabad szervesanyag, és a mikroaggregátumok adják (2-250 μm átmérőjű szemcsék). Az elsődleges szerkezet befolyásolja a mikrokörnyezetet, a felület aktivitását, és a szervesanyag stabilizáló hatását. A másodlagos szerkezetet (μm -mm átmérőig) az organo-minerális aggregált komplexek, a szabad szervesanyag, a makroaggregátumok ($>250 \mu\text{m}$ átmérőjű szemcsék), a gyökérszörök és a gombák hifái alakítják ki. (Bachmann 2008.) Ezek védik a talajt a fizikai hatások ellen, biztosítják a talaj porozitását és légátjárhatóságát, a pórusok kialakulását és a pórusok közti átjárhatóságot, a mikrofauna életterét illetve befolyásolják a talaj vízmegtartó képességét. (Leij 2002.) A terciér szerkezet (mm nagyságrend) a teljes érintetlen talaj (in situ), a makropórusok és a nagyobb gyökerek illetve a talaj makroszerkezete. Befolyásolja a makrofaunát, a bioturbációt, a pórusok folytonosságát, a talaj átnedvesedését és a gáz emissziót, a talaj kompakciót és a mintázatot. (Stefanovits 1975.) A talaj profilját (cm-es nagyságrend) pedonok segítségével, illetve a rögök minőségével, mennyiségével jellemezhetjük. A pedon az egységes talajfolt rétegzettséget reprezentáló legkisebb test. (Carter 2004.)

A talaj aggregációjának (mely aggregátumok kialakulását befolyásolják a duzzadási-zsugorodási folyamatok, a szerves kiválás valamint a duzzadási-száradási folyamatok intenzitása, száma, időtartama) hatását a talaj fizikai-kémiai tulajdonságaira (vízháztartás, aggregátumokon belüli pórushálózat, növények ellátása) Horn és Smucker tisztázták. (Horn és Smucker 2005.) A természetes folyamatokat, így a kialakuló aggregátumok tömörségét, a

talaj pórusrendszerét így vízháztartását is nagymértékben megváltoztathatja a mezőgazdaság. Az alkalmazott járművek a természetes erőhatásoknál jóval nagyobb erőt képesek kifejteni, visszafordíthatatlanul kompaktálhatják a talajt. (Horn és társai 2007., Hamza 2005., Lipiec 2006., 2009.)

2.4. A vizsgált talajjavítási módszerek

Az EU6-os INDEX projekt keretében a különböző gazdálkodási formák talajszerkezetet befolyásoló hatását is elemezték, valamint számos talajjavítási módszert próbáltak meg alkalmazni több kevesebb sikerrel. A spanyol El Aguilucho területén különböző talajművelési módokkal próbálták javítani a talaj szerkezetét, minőségét (teraszos művelés, újraerdősítés, mikorrhiza és/vagy szervesanyag adagolása, és ezek kombinációi), a szintén spanyol Tres Caminos és Abanilla területén talajjavítási kísérletek kombinációinak a hatásfokát vizsgálták (szervesanyag adagolása, mikorrhiza bekeverése a talajba, komposzt-, humoenzim-, szennyvíziszapadagolás), a spanyol Santomera katéna területén növényi borítottság növelésével próbáltak hatást gyakorolni a talajminőségre. Az eredményeim megértéséhez szükséges információkat foglalom össze röviden ebben a fejezetben.

Az El Aguiluchoban lefolytatott kísérletek alapján általánosságban elmondható, hogy a teraszosítás javítja a vízmegtartóképességet, amint azt Bastida és munkatársai is tapasztalták. (Bastida és társai 2007.b.) A talaj aggregációs állapotát a talajban működő folyamatok együttesen befolyásolják. (Horn és Smucker 2005.) E befolyásoló faktorok fontosságát már fél évszázaddal ezelőtt felismerték. (Six és Bossuyt 2004.) Csak néhány példát említve: a mikorrhizák és egyéb szaprofita gombák szerepe igen fontos a talaj aggregátumok kialakításában és stabilizálásában. A mikorrhizát képező gombával való beoltás a növények számára előnyös, mert szimbiózis alakul ki közte, és a növény közt. A mikorrhiza szó szerint gombás gyökeret jelent: a gomba fonalai, a hifák behálózják a gazdanövény gyökereit. A gomba segíti a növény víz- és tápanyagfelvételét, míg a növény szerves anyagokhoz és vitaminokhoz juttatja a gombát. Hirth és munkatársai szerint a gombafonalak közvetlenül összekapcsolják a mechanikai elemeket, illetve élettévékenységük során poliszaharidokat és lipideket termelnek, melyek ragasztóanyagként szolgálnak, elősegítik a talajszemcsék aggregációját, így javítják a talajszerkezetet. (Hirth és munkatársai, 1997.) A baktériumok méretüknél fogva nem játszanak közvetlen szerepet a talajszerkezet

kialakításában, ugyanakkor a szervesanyagok lebontása során ragasztóanyagokat (poliszaharidokat) termelnek. A gyökerek is képesek a vázrészek közvetlen összekapcsolására, amit a rajtuk élő mikrobák közvetett módon tovább segítenek. (Tisdall és Oades 1979., 1997., Ghazala Nasim 2005.) Tehát a növények gyökerei hatással vannak a talaj erodálhatóságára, javítják a talaj szerkezetét, mert ugyan összetörhetik a már létező aggregátumokat, de a keletkező aggregátumokat stabilizálják a talaj nedvességtartalmának csökkentése, illetve a gyökérhez tartozó mikrobák aktivitása révén. A szerkezet javulása, valamint a szerkezet erősségének kedvező növekedése, a talajdegradáció csökkenése leginkább 50% feletti növényi borítottság esetén észlelhető. (Ingelmo és társai 1998., Moreno-de las Heras 2009.) Az újraerdősítés nemcsak a talaj pórusrendszerét befolyásolja, növeli a talaj szervesanyag-tartalmát, és bizonyítottan befolyásolja a szervesanyag kémiai összetételét is. (Golchin 1996.)

A talajfaunán belül kiemelkedő fontosságú a földigiliszták szerepe, hiszen azon túl, hogy növelik a talaj szerves szén tartalmát, enzimeik közvetlenül részt vesznek a talajszerkezet kialakításában. (Bronick és Lal 2005., Barré 2009.) A talaj szerkezete javítható megfelelő mennyiségű szerves vagy műtrágya adagolással, melyek javítják a talaj pórusösszetételét, a talaj vízháztartását, a növények tápanyag-ellátottságának mértékét. Marinari és társai a különbséget abban látták, hogy a szerves-trágya adagolás a talaj biológiai aktivitását is megnövelte. (Marinari és társai 2000.) A projekten belül többféle szervesanyag-tartalom adagolási módszert próbáltak ki. Megjegyzendő, hogy a szervesanyag szerkezeterősítő hatása, csak megfelelő mennyiségű kalciumion tartalom (mely az agyagásvány részecskék és a szervesanyag-tartalom közti Ca-hidak által, szerkezetképző hatású) mellett nyilvánul meg. (Michéli 2002., Bronic és Lal 2005., Majzik és társai 2007. b.)

A különböző komposztálási folyamatok menetét vizsgálták Hernandez és társai 2005-ben, és megállapították, hogy a komposztált szennyvíziszap tartósabb hatású talajba keverve, mint az önmagában kihelyezett, hiszen kevesebb könnyen bomló vegyületet tartalmaz és a mikrobiológiai aktivitása is alacsonyabb. A fermentált szennyvíziszap komposztok homoktalajokra gyakorolt hatását vizsgálták 2000-es évek elejétől a Debreceni Egyetem Agrárcentrumának Nyíregyházi Kutatóközpontjában és Kisvárdán kisparcellás kísérletek keretében. Növekvő terméseredményeket és biológiai aktivitást figyeltek meg. (Makádi és társai 2006., Tomócsik és társai 2006.) A homok talajok komposztált szennyvíziszappal való kezelésének eredményessége folyásgörbe mérések alapján is kimutatható volt. (Szegei és társai 2008.) Ingelmo és társai bizonyították, hogy mind a komposztált mind a közvetlenül bekevert szennyvíziszapadagolás hatásosan javítja a talaj növény eltartóképességét; a talaj

széntartalmát meghatározva, a komposzttal kezelt terület bizonyult jobb minőségűnek. (Ingelmo és társai 1998., Bastida és társai 2008.b., Albiach 2000.) Albiach és társai 2001.b kutatásai szerint a komposztált városi szilárd szemét (MSW) adagolás bizonyult a talajjavítás legjobb módszerének, ezt követte a szennyvíziszap adagolás és a juhtrágya (hígtrágya) adagolás. A szennyvíziszapadagolás talajjavító hatása a növényi borítottság növekedésében is megnyilvánul, amint azt Bastida és társai 2007-es cikkükben közölték. (Bastida és társai 2007.c.)

2.5. A talajok vizsgálata

A talaj szerkezeti összetettségére már mások is felhívták a figyelmet. (Carter 2004.) A geometriát tekintve a talajszerkezet részecskék és pórusok méret és alak alapján elrendeződött halmazának tekinthető. A talaj fizikai térhálóját a talajszemcsék aggregációs folyamatai során alakul ki (mikro- és makroaggregáció), és képes ellenállni bármilyen természetes deformációnak, mint a növények gyökérzete, szántás, kapálás, vagy egyéb külső erőnek, mint a rázkódás, csúszás, aprózódás, nyírás, majd a ráható külső erő megszűnése után újra kialakulni. A szerkezeti stabilitás és termékenység megtartása szintén fontos. A talajszerkezet megismerése és a talajban lejátszódó folyamatok megértése nem egyszerű. Ezért van szükség a jelenlegi talajszerkezeti ismeretek bővítésére, pontosítására. A talajok szerkezeti degradációjának megismerése rendkívül fontos. Habár számos talajtani vizsgálati módszer létezik, azonban tudomásom szerint megfelelően kidolgozott, kvantitatív módszer nem ismeretes.

Azt már korábban is belátták az ebben a témában kutató tudósok, hogy egyetlen mérési módszerrel nem lehet minden körülmények közt, minden típusú talaj minőségét jellemezni. Ahhoz, hogy a talajra jellemző indexet megadhassunk szükség van biológiai, kémiai és fizikai vizsgálatokra is. Az volt a koncepció, hogy megmérték minden talajra jellemző paramétert pl. porozitást, szervesanyagtartalmat, vízmegtartó képességet stb., és ezeket valamilyen módon súlyozva és összegezve alkottak egy paramétert. (Karlen és társai 2003.) Mások obszervatóriumi megfigyelésekből származó adatokat felhasználva, talajerózió modellek segítségével jelezték előre a talajromlást és a precipitációt. (Michael és társai 2005., de la Rosa és társai 2005.) Sokkal célszerűbb lenne egyetlen olyan paraméter meghatározása, mely a többivel összefüggést mutat, ezért önmagában is megfelelő talajindikátor.

2.5.1. Talajtani vizsgálatok

A legtöbb talajtani vizsgálatot a talajok 2 mm alatti részecskéivel végzik, ilyen például a talaj víztartalmának, szervesanyagtartalmának és ionösszetételének vizsgálata. Kivételt képez a vízáteresztő-képesség, vagy pórusviszonyok és szemcseösszetétel vizsgálata (agronómiai szerkezet), ilyenkor a bolygatatlan talajokat vizsgálják. Az agronómiai szerkezet meghatározásához szitasorozatot (a különböző mérettartományba tartozó aggregátumok mennyiségének meghatározásához 20, 10, 5, 3, 1, 0,5, 0,25 mm lyukméretű szitákat) használnak. Az Arany-féle kötöttségi szám (K_A , $\text{cm}^3/100 \text{ g}$) meghatározása során a 100 g talajmintát dörzsmozsárban elporítjuk, és utána desztillált vizet adagolunk hozzá, míg csomómentesen képlékeny pépet nem kapunk, ezután cm^3 -ként addig adagoljuk a desztillált vizet, míg el nem érjük a képlékenységi felső határát. A kívánt állapot elérését az úgynevezett fonalpróbával állapítjuk meg. (A porcelántörőt belenyomjuk a mintába, és hirtelen kivesszük, a „talajfonál” elszakadása nyomán hegyes kúp keletkezik a pépen és a keverőn egyaránt. A képlékenységi felső határát akkor értük el, ha a kúp vége visszahajlik.) A kötöttebb talajok 10-20 cm^3 -es túladagolásnál is adják még a fonalpróbát, ezért az első megjelenést vesszük figyelembe. Az Arany-féle kötöttségi szám az adott konzisztencia állapot eléréséig felvett víz mennyiségével arányos. (Stefanovits 1975., Oads 1990., Buzás 1993., MSZ-08 0205:1978.)

A kötöttség nem csak az Arany-féle kötöttségi szám meghatározásával vizsgálható. Babarczy és Sárosi a Hankóczy által kifejlesztett farinográffal vizsgálta a magyar szőlőtalajok kötöttségét; valamint bebizonyították, hogy a különböző talajkötöttség meghatározására alkalmazott módszerek hasonló eredményt adnak (60-70% -os egyezés). (Babarczy és Sárosi 1952.) Kocsis és munkatársai nevéhez fűződnek a korai reológiai kutatások. Valorigráffal vizsgálták a talajok folyási/szerkezetképzési tulajdonságait. (Kocsis és társai 1996., 1999.) Számos publikáció vizsgálja a talajok szilárdságát penetrométer (ami egy kör keresztmetszetű hengeres próbatest) segítségével. (Moreno-de las Heras 2009.) Papiernik és társai 2006-ban egy lejtős hosszú-távon művelésnek alávetett terület degradációját a pH, TOC, szerves és szervetlen széntartalom, növényi borítottság mellett, penetrométerrel meghatározott szilárdságával jellemezték. Sikertelenül kimutatniuk a szervesanyag akkumulálódása okozta szerkezeti szilárdulást. (Papiernik és társai 2006.)

A talaj pH-jának meghatározásakor is porított mintából készítünk adott szilárd-folyadék arány mellett szuszpenziót, és annak a pH-ját mérjük meg. A talaj sűrűségét piknométer segítségével lehet megmérni. Ismert térfogatú és tömegű piknométert megtöltünk $\sim 1/3$ részig 105°C-on szárított talajjal és megmérjük a tömegét. Ezután bürettából annyi

alkoholos xilolt adagolunk a talajra, hogy jól elfedje. A talajrészecskékhez tapadt légbuborékokat enyhe rázogatóssal eltávolítjuk, majd a piknométert a bürettából jelig töltjük. A fogyott alkoholos xilol térfogatát a piknométer pontos térfogatából levonva megkapjuk a piknométerben lévő talaj térfogatát. A száraz talaj tömegének és térfogatának ismeretében a talaj valódi sűrűsége számítható. Az általam használt minták sűrűségadatai a tanszéken He-piknométerrel lettek meghatározva. A talajok víztartalma többféleképpen jellemezhető. (Stefanovits 1975.) A különböző feltételek között a talajban visszamaradó víz mennyiségét nevezzük vízkapacitásnak. Megkülönböztetnek maximális, kapilláris, minimális és szabadföldi (más néven: szántóföldi) vízkapacitást.

A talajokra jellemző szabadföldi vízkapacitás (VK_{sz}) az a vízmennyiség, amit a talaj beázás után a gravitációval és a szárazabb talajrétegek szívóhatásával szemben, a természetes környezetben vissza tud tartani. Értéke függ a talaj szemcseösszetételétől, szerkezetétől, rétegzettségétől, duzzadókéességétől és a talajvízszint elhelyezkedésétől.

Számos olyan módszer létezik, mellyel a talajszerkezetre, annak minőségére információt nyerhetünk. Ilyen a talaj vízmegtartóképessége, a szénmegkötő képesség, a növényi borítottság, a hulladék tápanyagként való hasznosításának mértéke és még sorolhatnánk. A figyelembevett szempontok mindenki számára mást jelentenek. Karlen és társai (2003.) összefoglalták a talajban lezajló folyamatok, és a meghatározható paraméterek közötti összefüggéseket. Schoenholtz és társai 2000-ben megjelent cikkükben összegezték és talajfunkciók alapján csoportosították az indikátorként alkalmazható módszereket. A talajindikátorok esetén fontos, hogy a fizikai és kémiai talajparamétereket is jellemezze, legyen kellően érzékeny a indokolandó változásokra, könnyen mérhető, és mutassa ki az egyes területek talajai közti különbséget térben és időben. Fontos, hogy használata gazdaságos legyen, a termékenységgel és a biodiverzitással közvetlen kapcsolatban álljon és különböző ökoszisztémák esetén is alkalmazható legyen.

Az EU6-os INDEX (www.soil-index.com) projekt keretein belül többféle talajparaméter indikátorként való alkalmazhatóságát vizsgálták. A talajszerkezet jellemzésére általánosan elfogadott, a talaj szervesanyagtartalmának (Bastida és társai 2008.a.), leggyakrabban az oldott szervesanyag (DOM) vagy a szerves széntartalomnak a vizsgálata; illetve valamilyen biológiai paraméter, mint a mikrobiológiai aktivitás vagy a talajok enzimaktivitásának meghatározása. (Bastida és társai 2006., 2007.b., 2008.a, b., Zsolnay 2003., Akagi és társai 2007.) Korábbi vizsgálatok alapján a mikrobiológiai aktivitást Albiach és társai nem találták megfelelő talajminősítési módszernek. (Albiach és társai 2001.a.) Bizonyították, hogy a talaj mikrobiológiai populációja félszáraz területeken a talaj

degradáció bioindikátoraként alkalmazható, és információval szolgál a talaj funkcionalitásáról és mikrobiológiai állapotáról. (Bastida és társai 2007.a.) A talaj mikrobiológiai diverzitása is jellemző érték. A degradáltabb területeket nagyobb diverzitás jellemezte. (www.soil-index.com.)

Egy másik talajminősítési módszer mikrobiológiai szén tömegének a meghatározása, miután a szenet etanol mentes kloroformmal felgőzöljük és az elpusztult sejtekből híg sóoldattal (kálium szulfáttal) kiextraháljuk. A légzésből származó kibocsátott széndioxid infravörös gáz analízissel detektálható. (Bastida 2006., 2007.b., www.soil-index.com.) Bastida és társai 2007-ben bemutatták, hogy a teljes szerves szén és a mikrobák széntartalma, melyet korábban széleskörben vizsgáltak, mellett igen fontos a talaj mikrobiológiai aktivitásának (pl. az ATP és a foszfatázaktivitás) meghatározása. Ceccanti kutatásokat végzett a β -glükózidáz humoenzim komplexek, melyek kis mennyiségű előfordulása az egyes talajművelési módokra jellemző, izoelektromos fókuszálással valamint ultraszűrőssel történő kimutatására. (Ceccanti 2008.) Az is bizonyított, hogy az enzimaktivitás mérések eredményei alkalmasak két erdős ökoszisztéma felső talajrétegének megkülönböztetésére (Masciandaro és társai 2008.), valamint általuk nyomkövethető a mezőgazdaság talajt degradáló hatása. (Caravaca és társai 2002.) Albiach és társai (2000.) a különböző típusú szervesanyagadagolás hatását vizsgálták enzimaktivitás meghatározás segítségével. Az általuk vizsgált talajok esetén a komposztált városi szilárd szemét (MSW) adagolás bizonyult a talaj javítás legjobb módszerének, ezt követte a szennyvíziszap adagolás (Albiach és társai 2001.b.) és a juhtrágya (hígtrágya) adagolás. Bastida és társai (2008.) a komposztált és az közvetlenül bekevert szennyvíziszapadagolás hatásait a talaj mikrobiológiai tulajdonságai, enzimaktivitások, valamint a növényi borítottság által jellemezték. Mindkét talajjavítási módszer növekedést okozott a mért paraméterekben, és növelte a talaj növényi borítottságát. Különbség csupán a kezelt talajok széntartalmában mutatkozott, mely a komposzttal kezelt terület esetén szignifikánsan magasabbnak bizonyult. (Bastida és társai 2008.b.)

Pascual és társai a fentebb említett paramétereket (TOC, enzimaktivitások, széntartalom) elemezve, jellemezték egy hosszú távú talajjavítási kísérlet hatásait, melyben az ipari szemetet használták talajjavításra, és kimutatták a módszer hosszú távú talaj termékenység fokozó hatását. (Pascual és társai 2000.) A növényzet mennyiségével (pl. borítottság) és minőségével (méret, élettartam) is jellemezhető a talaj minősége, gyakran használják ezt a módszert például komposzt kihelyezés, szennyvíziszap adagolás hatásának vizsgálatokor. (Ingelmo és társai 1998.)

Ezen módszerek sajnos, csak egyes talajfunkciókat jellemeznek, nem feltétlenül változnak párhuzamosan, így önmagukban csak részinformációt adnak a talaj minőségéről.

2.6. Reológia

A reológiai mérésekkel a szerkezetre jellemző, kvantitatív paraméterek nyerhetők, analóg módon a nyírófeszültség értékével, ami egy egyszerűen használható talajmechanikai módszert alkalmazva (torziós erőt mérve) határozható meg. (ASTM Standard D 2573-94) A reológiai az anyag külső deformáló hatásokkal szemben tanúsított, folyással együtt járó viselkedését írja le. (Mózes, Vámos 1968., Barnes és társai 1989.)

Alapja a klasszikus mechanika, mint az ideális rugalmasságot leíró Hook törvény, az ideális viszkózus tulajdonságokat jellemző Newton törvény és az ideális plasztikus (Saint-Venant) testek viselkedését leíró törvényszerűségek.

Reológiai testnek nevezzük az anyagi világnak azon elhatárolt részét, amely a reológiai vizsgálatok tárgyát képezi. M. Reiner rendszerezése szerint három egyszerű és három összetett reológiai testet különböztetünk meg. (Szántó 1986.)

Az egyszerű testek:

- ideálisan rugalmas (elasztikus), vagy Hooke-test, amelyet egy acélrúgó szimbolizál, ilyen pl. a fémek viselkedése a reverzibilis deformáció tartományában;
- ideálisan viszkózus, vagy Newton test, amelyet ideálisan súrlódó dugattyú jelenít meg, ilyen pl. az ideálisan viszkózus folyadékok folyása;
- ideálisan képlékeny (plasztikus), vagy Saint-Venant test, egy csúszó elemmel modellezhető, amely adott nyírófeszültség küszöbértékig nem mozdul, felette egy testként, ellenállás nélkül mozog. (Mezger 2002., Steffe 2007.) Mezger egy deformálható anyagot akkor nevez plasztikusnak, ha alacsony sebességgradiens esetén elasztikus vagy viszkoelasztikus testként, viszont magasabb tartományban folyadékként viselkedik.

Gyakorlatilag majdnem minden rendszer, beleértve a talajokat is, összetett tulajdonságokat mutat. Az elasztikus, viszkózus és plasztikus tulajdonságok kombinációja összetett rendszereket, főként olyan viszkoelasztikus és viszkoplasztikus rendszereket eredményez, mint a rugalmas folyadékok (a Maxwell testek, pl. makromolekulás oldatok) vagy viszkózus szilárd anyagok (Kelvin testek, pl. gumi) és a nyírásra szilárduló tulajdonságokat mutató rendszerek vagy a reális plasztikus, nyírásra elfolyósodó rendszerek,

mint a jól ismert Bingham test (pl. kerámia- és festék szuszpenziók), mely az ideálisan viszkózus és az ideálisan képlékeny test kombinációja. (Mezger 2002., Steffe 2007.)

A reológia folyással járó deformációkkal foglalkozó tudomány. A deformáló hatás a nyírás, mely azt jelenti, hogy a testre a felülettel párhuzamosan hat a deformáló erő. A deformáló erő hatását a felületegységre vonatkoztatjuk, mert nagysága arányos a felülettel, melyen a nyíróerő hat. Ezt a felületegységre ható nyíróerőt nevezzük nyírófeszültségnek (jele: τ , mértékegysége: Pa). (Szántó 1986.)

Ideálisan elasztikus rendszereknél a feszültség- és a deformáció komponensek között lineáris függvénykapcsolat van:

$$\tau = \mu \frac{dx}{dy}$$

ahol μ a rendszer anyagi tulajdonságaitól függő rugalmas nyírási modulus; dx/dy pedig a deformáció mértéke (más néven nyírásgradiens), dimenzió nélküli szám.

Ideálisan viszkózus rendszereknél a folyást létrehozó feszültség és a deformáció sebesség komponensei között lineáris a függvénykapcsolat (Newton törvény):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta D$$

ahol η a dinamikus viszkozitás, mértékegysége Pas; v az időegységre eső x irányú elmozdulás (dx/dt); dv/dy a sebességgradiens (D), mértékegysége 1/s.

Ideálisan plasztikus rendszereknél $\tau = \tau_0$, ahol τ_0 az a kritikus nyírófeszültség, amelynél kisebb erők hatása alatt a folyásegységek összekapcsolva maradnak. (Szántó 1986., Or és Ghezzei 2002., Barnes és Hutton 1989., Szegi és társai 2004., Barnes 1997., Steffe 2007.)

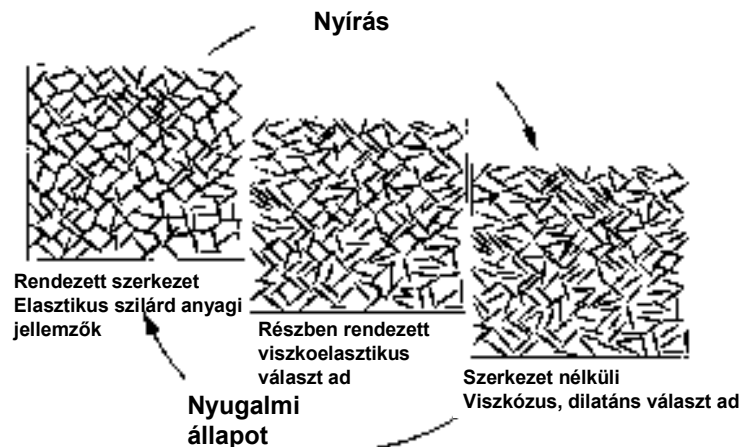
Az áramlás ezt a küszöbértéket (abszolút $\sim (\tau_0)$, vagy nulla sebességgradiensre extrapolált (τ_B) folyáshatárt) elérve indul meg, ettől kezdve a folyásgörbe lineáris. Erre a szakaszra egyenest illesztve a tengelymetszet a folyáshatár (τ_B , Pa), a meredekség pedig a plasztikus viszkozitás (η_{pl} , Pas) értékét szolgáltatja: $\tau = \tau_B + \eta_{pl} d\gamma/dt$ a Bingham modell szerint. Bingham a kerámia és festékiparban felmerülő kérdések, mint például a vizes közegű agyag illetve organikus közegű pigmentszuszenziók egyedi folyási viselkedése miatt kezdett el részletesebben foglalkozni ezekkel a rendszerekkel (kerámia ipari kaolin szuszpenziókkal), és megalapozta a képlékeny anyagokra vonatkozó reológiai ismereteket. (Szántó 1986.)

Az anizometrikus részecskéket tartalmazó, jól szolvatálódó, közepes adhézíójú és térbetöltésű rendszerek hajlamosak tixotrópiát mutatni. A tixotrópia időfüggő tulajdonság. Nyugalomban a rendszerben lévő részecskék vázszerű szerkezetet hoznak létre, amely

mechanikai behatásra (keverés, rázás, mozgatás) összeomlik, és folyás indul meg. A külső mechanikai hatás megszűnte után az eredeti váz újra felépül, ha ehhez elég időt hagyunk. Tixotrópia akkor jelenhet meg amikor a deformáció sebesség gyorsabb, mint a relaxációs sebesség, a sebességgradiens növekedésével elfolyósodik a rendszer, majd csökkentésekor, a lassú koagulálás hatására kezd újra felépülni a szerkezet. A szerkezet újrafelépülését a koagulálási és nyírási sebesség viszonya határozza meg.

2.6.1. A talajszuszpenziók reológiája

A szuszpenziók reológiája évtizedek óta a figyelem középpontjában áll, főleg ipari felhasználhatóságuk (kerámia, élelmiszeripar, építészet) miatt. (Rosquoët és társai 2003.) E módszer segítségével információt adhatunk a szuszpenziók szerkezetének erősségéről, nyírással szembeni ellenállóképességükről. A szuszpenziókban kialakuló szerkezet szilárdságát befolyásolja a térfogategységben levő, dinamikailag viszonylag önálló részecskék száma, a köztük levő kötéspontok száma és erőssége, tehát a részecskék közti adhéziós erők. (Barnes és Hutton 1989., Mózes-Vámos 1968.) A szuszpenziók gyakran szerkezeti viszkózusságot mutatnak valamint a viszkózus és a plasztikus folyási tulajdonságok kombinációját. A folyadékban diszpergált részecskékből kialakuló viszkoplasztikus részecskeháló folyáshatárokkal jellemezhető, mint a Bingham-féle folyáshatár és az abszolút folyáshatár. A folyáshatár egy koherens rendszerre jellemző nyírófeszültség érték (felületegységre vonatkoztatott tangenciális erő), ami a szerkezet összeomlására, a szerkezeti kötőerők letörésére jellemző, melyet viszkózus folyás követ. (Dzuy és Boger 1983.) Alacsony sebességgradiens értékeknél a részecskeháló, pl. az agyagásványszuszpenziók a lamellák lap-él elrendeződés (Tombácz és Szekeres 2004., 2006.), miatt mutatnak rugalmasságot. A viszkoelasztikus jelleg is megnyilvánul, de magasabb sebességgradiens tartomány esetén elfolyósodik a rendszer. (Mezger 2002.) A szuszpenziók tixotrópiát mutathatnak. (3. ábra)

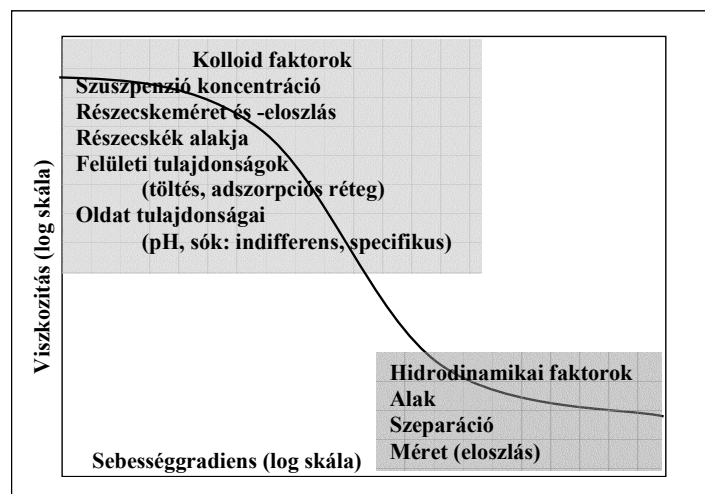


3. ábra Tixotróp rendszer viselkedése, nyírás hatására

A tixotrópia időfüggő tulajdonság, egy régebbi nézet szerint a szol-gél rendszerekre jellemző, melyek mikroszerkezete nyírás hatására izoterm, reverzibilis változást mutat. A tixotróp jelenség jellemzéséhez növekvő, majd csökkenő sebességgradiens mellett mérjük a folyásgörbét. A kialakuló hiszterézis hurok alakja jellemző, a felszálló illetve leszálló ág által közrezárt terület által pedig számszerűsíthető a tixotrópia mértéke. Az extrém szerkezeti viszkózusság, mely nyugalomban közel szilárdszerű állapotot, de stressz hatására elfolyósodást jelent, szintén tixotrópiának tekinthető. (Barnes 1997.)

A kétfázisú részecskehálók, mint a szuszpenziók, áramlásának következtében fellépő belső súrlódása (viszkózitása) kolloid és hidrodinamikai folyamatok által befolyásolt, melyek függenek a sebességgradiens értékétől. Összehasonlítható állapotban (alacsony sebességgradiens, magas viszkózitás) a kolloid paraméterek irányító szerepe dominál. Állandó koncentrációjú szuszpenziók nyírással szembeni ellenállása növekszik mind a térfogategységenkénti kötéspontok számának (pl. csökkenő részecskeméret), mind a kötéspontok erősségének növelésével (pl. csökkenő felületi töltés, növekvő sókoncentráció). A növekvő sebességű áramlás következtében a fizikai térháló összeomlik, a viszkózitás jelentősen csökken (4. ábra), és nagyobb sebességgradiens tartományban már a részecskék áramlástani tulajdonságai (pl. a lamellák beállása az áramvonalakkal párhuzamosan) válnak meghatározóvá.

A legkisebb változás is, még a talajrészecskék felületének minimális módosulása (Johnston és Tombác 2002.) vagy a részecskéket körülvevő vizes fázisé, mint a talajoldat, megfigyelhető alacsony sebességgradiens értékeknél (low shear).



4. ábra Vizes szuszpenziókra jellemző sematikus ábra, a kolloid és hidrodinamikai faktorok hatása a viszkozításra, a sebességgradiens függvényében

A reológia talajmechanikai alkalmazása még nem túl gyakori. A reometria a különböző folyadékok, rugalmas és plasztikus rendszerek reológiai tulajdonságainak mérésére szolgál jól kidolgozott mérés technika (Mezger 2002.), mely talajszuszpenziók mérésére is alkalmas. Markgraf és társai a reometriát a talajok és agyagásványszuszpenziók külső hatásokra kialakuló mechanikai tulajdonságait megfelelően leíró módszerként jellemezték. Cikkükben összefoglalták a reológiai és a talajmechanika főbb törvényszerűségeit. Magyarították a szuszpenziók viszkoplasztikus (Bingham) és viszkoelasztikus tulajdonságait, valamint vizsgálták a sókoncentráció és az ásványi összetétel hatását. Sajnálatos, hogy a szuszpenzió koncentráció hatását figyelmen kívül hagyták. (Markgraf és társai 2006.) (Csak a Na^+ -koncentráció változásának hatását elemzik, pedig a szuszpenzió víztartalma egyéb szuszpenziók reológiai mérésénél is vizsgálat tárgyát képezte. Rosquoët és társai 2003.) Ghezzehei és Or a víztartalom hatását, az agyagásványtartalom milyenségét, valamint az alkalmazott frekvencia hatását vizsgálták a nedves talajok és agyagásványszuszpenziók esetén, de a sókoncentráció talajokra gyakorolt hatásáról szót se ejtettek. (Ghezzehei és Or 2001.) A már ismert reológiai törvényszerűségeket foglalták össze két másik cikkükben. (Or és Ghezzehei 2002., Ghezzehei és Or 2003.) A talajszuszpenziók egy fontos tulajdonságáról, a tixotrópiáról megfeledkeztek, pedig a talajszuszpenziókat évtizedek óta a tixotróp rendszerek közt tartják számon. (Barnes 1997.) A talajszuszpenzióknak ez a nagymértékű érzékenysége a külső erőhatásokra, illetve a részecskéhaló időfüggő nyírási-ellenállási tulajdonságai, egyik itt említett szerző publikációjában sincsenek említve. (Bongiovanni és Lobartini 2006., Bronic és Lal 2005., Lipieca és Hatano 2003.) A talajszuszpenziókat tárgyaló

publikációk (Markgraf és társai 2006., Or és Ghezzehei 2002., Ghezzehei és Or 2001., 2003.) a talajok mechanikai tulajdonságait, az agyagásványszuszpenziókéval összevetve, megfelelően jellemző módszerként mutatják be a reológiát. A mezőgazdasági művelés során használt járművek káros hatásait a talajszerkezetre oszcillációs mérések segítségével modellezték. (Ghezzehei és Or 2001.) Markgraf ugyanezt a módszert a talajok mikrostruktúrájának jellemzésére használja. (Markgraf és Horn 2009.a, b.)

Majdnem kizárólagosan agyagásvány szuszpenziókat (Na-bentonit, kaolinit, Ca-montmorillonit, Na-montmorillonit illetve ezek keverékei) használnak, hogy az iszap és homok frakciók heterogenitása és különbségei nélkül vizsgálhassák a talajok alapvető folyási tulajdonságait. (Neaman és Singer 2004.) A Kolloidkémia Tanszék agyagásványokkal kapcsolatos tapasztalatai régi keletűek. A huminsavak hatása (Tombácz és társai 1984.), vasoxidok (Tombácz és társai 2001.), a kicserélhető kationok (Tombácz és társai 1989.), indifferent és specifikus kationok huminsavak jelenlétében (Tombácz és társai 2004., Majzik és Tombácz 2007.), a pH és az ionerősség hatását (Tombácz és Szekeres 2004.) főként montmorillonit szuszpenziók esetén vizsgálták korábban, de a kaolinit szuszpenziók is a figyelem középpontjába kerültek. (Tombácz és Szekeres 2006.)

Mivel a reológiai mérések a szerkezet erősségét kvantitatív paraméterekkel minősítik, célom a talajszerkezet jellemzésére szolgáló reológiai módszer kidolgozása volt, mely segítségével időben illetve térben meghatározható a talajdegradáció mértéke, és az azonos ásványi összetételű, de különböző felhasználási és beavatkozási területek is összevethetőek. A talajszuszpenziók pontos reológiai mérési metodikájának kidolgozása mellett célom volt olyan paraméterek meghatározása, melyek a talaj minőségére és a talajdegradációra jellemzőek.

3. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. Kísérleti anyagok

Munkám során talajszuszpenziók reológiai tulajdonságait vizsgáltam, melyeket adott szempontok szerint kiválasztott európai talajmintákból (www.soil-index.com) készítettem desztillált víz hozzáadásával. A szuszpenziókészítéshez használt talajminták Európa különböző területeiről (1. kép) (Magyarország, Németország, Olaszország, Spanyolország)

származnak, ásványi összetételük, minőségük igen eltérő. Az egyes területeken különböző gazdálkodás (hagyományos vagy bio), művelés (teraszos művelés, szántás vagy kaszálás) vagy talajjavítási kísérlet folyik (például szervesanyag adagolása, mikorrhiza bekeverése a talajba), illetve vizsgálják a területek eróziójának vagy növényi borítottságának és éghajlatának hatását a talajok szerkezetére. Munkám során 9 mintázási helyről származó, két egymásutáni évben mintázott talajokat vizsgáltam, 2004-ben 48 és 2005-ben pedig 43 talaj mérésére került sor. A nagy mennyiségű adat elemzése meghaladja a értekezés korlátozott terjedelmét. Így az eredményekből csak néhányat szeretnék bemutatni, és csak a teljeskörű elemzésre szánt mintázási helyek pontos leírását közlöm a „kísérleti anyagok és módszerek” című fejezetben, a többi esetben a leírt eredmények mellett tüntetem fel a minták rövid jellemzését.



1. kép Mintázási helyek elhelyezkedése

3.1.1. Mezőgazdasági hatásokat modellező és különböző növényi borítottságú területek

Négy katéna talajait vizsgáltam. A katéna talajsorozat, mely tagjai azonos korúak, azonos módon alakultak ki, hasonló éghajlati tényezők hatnak rájuk, de pl. a domborzat és a vízelvezető képesség különböző, ezért valamilyen fizikai, kémiai vagy biológiai paraméterben különböznek egymástól. A különbséget befolyásolhatja a gazdálkodás módja, a növényi borítottság, a talajjavítás módja is, vagy a terület irányultsága, elhelyezkedése. (Brady és társai 1999.)

A mezőgazdaság hatásait a német Puch kísérleti parcellákon, valamint az olasz Pantanello kísérleti parcellákon, Basilicata és Tuscany területéről származó talajmintákon tanulmányoztam. A spanyol Santomera katéna területén a növényi borítottság változásának hatásai vizsgálhatóak.

A **Puch minták** (2. a, b, c. kép) egy németországi, hosszú távú (50 éves) talajművelési kísérletből származnak. Münchentől 40 km-re észak-nyugatra elterülő parcellák, talajtípusuk homokos agyag (Orthic Luvisol, FAO, 1990.)



2. a, b, c kép. Puch minták (A (normál mezőgazdaság), G (rossz gazdálkodás), B (extrém rossz gazdálkodás))

A területen évente 700 mm csapadék esik, az átlaghőmérséklet 8 °C, az átlagos precipitáció, 900 mm/év, a területet sivatagosodási folyamatok jellemzik. A száraz hónapok száma 5. A kísérleti parcellák területe 450 m². Az A (Agricultural) jelzésű minta esetén normál mezőgazdasági termelés (gabonatermesztés, *Triticum aestivum* L.) folyik a területen. A B

(Black) jelzésű esetén, a területen a folyamatos szántás miatt nincs növényzet, az extrém rossz gazdálkodást utánozzák. A G (Green) jelzésű minta esetén, a területen erősen korlátozzák a növényzet növekedését, egy évben kétszer szántják ki, közben nem trágyáznak, és nem ellenőrzik a területet. (Akagi és társai 2007., INDEX, Site description.) Megjegyzés: frakciók < 1 mm kerültek mérésre, ami közel 100 % -a a Puch mintáknak.

A **Pantanello** kísérleti parcellák, **Basilicata, Tuscany** (3. a, b. és 4. a, b. kép) Olaszország területén a biológiai (BA) és a hagyományos mezőgazdaság (CA) hatásait követhetjük nyomon.



3. a, b. kép Basilicata minták (biológiai (BA) (bal oldali) és a hagyományos mezőgazdaság (CA) (jobb oldali))



4. a, b. kép Tuscany minták (biológiai (BA) (bal oldali) és a hagyományos mezőgazdaság (CA) (jobb oldali))

Több mint négy éve folyik gazdálkodás a területen. Talajtípusuk: Eutric Cambisol és Eutric Vertisol. A biológiai (Biological Agricultural) gazdálkodási területen juh trágyával javítják a talajt, míg a hagyományos (Conventional Agricultural) gazdálkodású területen műtrágyázás folyik (25% N, 15% P, ammónium nitrát és ammónium foszfát formájában) mindkét területen azonos növényi termelést folytatnak, és mindkettő termékeny. Megjegyzés: frakciók < 1 mm kerültek mérésre, ami több, mint 90 %-a a mintáknak.

A **Santomera katéna** (5. a, b, c. kép), Murcia, Spanyolország területén található mediterrán síkság, ahol a *Pinus halepensis* és a természetes puszták váltakoznak.



5. a, b, c. kép Santomera katéna (F (erdős terület), S (cserjés, közepesen degradált terület), B (kopár, 100%-osan degradált puszta))

Három különböző talajt mintáztak: természetes talajt, mely aleppói fenyővel F (erdős terület, Forest) teljes mértékben borított; egy részben erodált, 50%-os növényi borítottságú talajt S (Shrub, cserjés terület); és egy még degradáltabb talajt, kevesebb, mint 25%-os növényzet borítottsággal B (Bare: kopár terület). (Index-site-description 2004.) A területen hosszú távú

kísérlet folyik, mely során a növényi borítottság vizsgálatával jellemzik a talajerózió és a visszaerdősítés hatását.

A kísérleti parcellákban az erdős talaj (Forest, Fp) és az eltávolított erdő talaját (Devegetated, Removed forest, Fm) hasonlíthatjuk össze. Ezek is a homokos talajok közé sorolhatóak, típusuk Lithic calcixeroll (Calcic Kastanozem, FAO, 1990). Tipikusan mediterrán terület félszáraz klímával, ahol az átlagos precipitáció 300 mm/év és az átlag hőmérséklet 18 °C. A csapadék 75 %-a áprilisban és októberben hullik. Tehát jellemzően egyenetlen a csapadék eloszlása. Ritka, de igen erőteljes esőzések jellemzik a területet, ami talajeróziót okoz. Az aránylag magas átlaghőmérséklet miatt a lehetséges evapotranspiráció értéke igen magas, ami szárazodáshoz vezet. Megjegyzés: frakciók < 1 mm kerültek mérésre, ami a minták 50- 90 %-a.

3.1.2. Remediációs kísérleti parcellák

A Santomera (Tres Caminos) kísérleti parcelláin és az olasz Abanilla katéna területén talajjavítási kísérletek folynak. Az El Aguilucho területen újraerdősítési talajjavítási kísérlet és teraszos művelés kombinációja folyik.

A **Santomera, Tres Caminos** (6. kép) kísérleti parcellák szintén az előbb leírt területen belül találhatóak, tehát a klíma és a talajtípus hasonló. Ezek a rövidtávú kísérletek 2004-ben kezdődtek.



6. kép Santomera Tres Caminos (magyarázat a szövegben)

Az 5 x 5m-es parcellákon a következő kísérletek folytak: szervesanyag adagolás SS (sewage sludge: friss szerves hulladék, szennyvíziszap), komposzt adagolás C (compost: érlelt szerves anyag, komposztált szennyvíziszap), újraerdősítés Rf (reforest: folytonos borítottság), újraerdősítés mikorrhizával RFm (reforest with mycorrhiza: folytonos növényborítottság, mikorrhiza bekeverés hatása) és magvak adagolása S (seed: olyan magkeverékkel szórják be a területet, mely a félszáraz területekre jellemző). Megjegyzés: frakciók < 1 mm kerültek mérésre, ami a minták 54-86 %-a.

Az **Abanilla katéna** Spanyolország félszáraz mediterrán régiójában található, ahol az átlag csapadék 200-300 mm. Az átlagos evapotranspiráció ötszöröse is lehet az átlagos csapadékmennyiségnek, mely nagymértékben befolyásolja a terület talajának minőségét.

A jellemzően domináns talaj a Xeric Torriorthents, mely hajlamos a degradációra és az elsivatagosodásra ezek közt a körülmények közt, tehát alacsony szervesanyagtartalom és alacsony növényi borítottság mellett.

Az **Abanilla hosszútávú kísérleti parcellákon** (7. kép), a külső szervesanyagbevétel hatására a növényi borítottságban különböző mértékű eltérés alakult ki. 1988 októberében öt darab 87 m² parcella 10 %-os lejtővel került kiválasztásra. Egy kontroll terület mellett a többin Murcia területéről származó, különböző szervesanyagtartalmú (különböző mértékű, szilárd kommunális szemétből nyert) szervesfrakciót adagoltak, ezzel 0,0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 g/100g-ra növelve a szervesanyagtartalmat. A szervesanyagot a felső 15 cm-res rétegbe forgatták be. (Bastida és társai 2007.c.) Megjegyzés: frakciók < 1 mm kerültek mérésre, ami a minták 46-58 %-a.



7. kép. Abanilla kísérleti parcellák (magyarázat a szövegben)

Az **El Aguilucho** katéna (8. a, b. kép) Spanyolország területén található, ahol újraerdősítési remediációs kísérlet folyik. (Bastida és társai 2007.b.)



- 8. a. (bal oldali kép)** El Aguilucho teraszok, melyeken szervesanyag adagolás és fenyvesítés; szervesanyag és mikorrhizával kezelt fenyves ültetése kombinálva; szervesanyag adagolás, fenyvesítés, és mikorrhiza adagolás folyik
- b. (jobb oldali kép)** El Aguilucho Teraszok, melyeken fenyősfítés; mikorrhizával kezelt fenyő ültetése; és fenyősfítés és mikorrhiza adagolás kombinálva folyik (magyarázat a szövegben)

Ezen belül: fenyősfítés (P: Pine), járulékos kezelés: mikorrhizával való beoltás (M v.m), szerves anyag (OM) bevitel, teraszos (T) (0.8 m széles, 70 m hosszú) művelés illetve ezek kombinációja folyik. A K: kontroll minta, a POM: fenyővel borított és mikorrhizával kevert szervesanyaggal javított talajminta, a TP: erdősített teraszos terület, a TPm: erdősített teraszos terület mikorrhizával javítva, TPMs: erdősített teraszos terület mikorrhizával kezelt talajjal javítva, a TPOM erdősített teraszos terület szervesanyaggal javítva, TPmOM erdősített teraszos terület mikorrhizával és szervesanyaggal javítva, a TPOMMs: erdősített teraszos terület szervesanyaggal és mikorrhizával kevert talajjal javítva. A terület félsivatagos, évente 300 mm csapadék hull, az átlaghőmérséklet 18 °C, a száraz hónapok száma 11.

A talajok reológiai paraméterei közvetlenül nem határozhatók meg, desztillált vizes talajszuszpenziók készítése szükséges. A szuszpenziók bizonyos víztartalom-tartományon belül mérhetőek. A mérhetőség felső határértéke, tehát a legmagasabb szárazanyagtartalom, így a legkisebb víztartalom, amivel összeállnak a porhalmaz részecskéi, a festékipari vízsám értéke, melynek értéke 10-27 g/100g lehet szuszpenzióra vonatkoztatva. A vízsám egyszerűen meghatározható: ismert tömegű talajmintához bürettából annyi vizet csepegtetünk, amíg egy erős spatulával összedolgozva össze nem áll, ekkor az összetapadt talajszemcsék spatulára felragadnak. Az alsó határérték az egyensúlyi üledék szilárdanyag-

tartalma, amely hosszú állás után a talajmintából készített szuszpenzióban kialakul, azaz a talajszemcsék csak az egyensúlyi üledékben lévő vizet képesek bezárni (okkludált víz), így maximum ennyi vízzel készíthető homogén eloszlású talajszuszpenzió, mely egészét kitölti a fizikai térháló. Az egyensúlyi üledékek víztartalma általában 29-40 g/100g között változik szuszpenzióra vonatkoztatva, de különleges esetekben, például magas sótartalmú talajok esetén elérheti a 60 g/100g-os értéket is. Ez a víztartalom érték közelíti, és párhuzamosan változik a talajtanban használatos szabadföldi vízkapacitás, vízmegtartóképesség (WHC – water holding capacity) értékével, melyet a talaj teljes átnedvesítése, majd homokágyon való leszívása után mérnek.

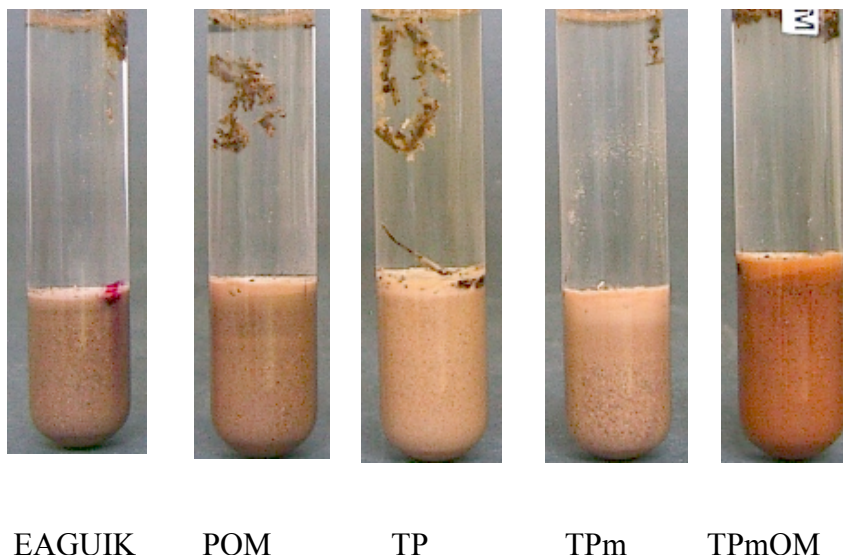
Egyensúlyi üledéktérfogot mérésekkel meghatároztam a talajmintákra jellemző víztartalmakat, és összehasonlítható állapotú szuszpenziókat készítettem. A szuszpenzió készítési és mérési körülményeket standardizáltam. A talajszuszpenziókat mérés előtt 1 mm-es lyukbőségű szitán szitáltam, hogy a szálakat, kis köveket, magvakat esetenként fenyőtűskéket eltávolítsam. Majd elkészítettem a meghatározott víztartalmú szuszpenziókat, és üvegbotos illetve ultrahangos homogenizálás és egy napos állás után elvégeztem a reológiai méréseket.

3.2. Módszerek

3.2.1. Talajszuszpenziók összehasonlítható állapotban meghatározott víztartalmának meghatározása

Az összehasonlítható állapotú talajszuszpenziók (úgynevezett egyensúlyi üledékek) készítéséhez szükséges víztartalom meghatározható úgy, hogy híg talajszuszpenziókat készítünk, majd azokat ülepedni hagyjuk.

A szuszpenziókészítés menete a következő volt: 10 ml-es kalibrált (ismert tömegű desztillált víz térfogatokat bejelölve) kémcsőbe bemértem $4 \pm 0,01$ g (m_s) talajt (<1 mm-es szitafrakciót) és 10 ml desztillált vizet adagoltam hozzá (9. kép). Kb. egy percre üvegbot segítségével homogenizáltam a szuszpenziót, majd 10 másodpercre ultrahangos kádba helyeztem azt. Majd az egész keverési folyamatot egy órán belül, még kétszer megismételtem. A kémcsövet ezután néhányszor óvatosan átforgattam, hogy a levegő buborékok távozzanak, majd vízszintezett állványba állítottam, és egy hétig szobahőmérsékleten állni hagytam.



9. kép Kémcsőkísérletek, egyensúlyi üledékek víztartalmának meghatározása, a szuszpenziókészítéshez használt talajok szemcsemérete 1 mm alatti

Az üledék térfogatot a kalibrált (jelzésekkel ellátott) kémcsőről (V_{sed} , cm^3) leolvastam. Az egyensúlyi üledék víztartalmát (H_2O g/100 g), amelyet az összehasonlítható állapotként definiálunk (WCSSinCS – water content of soil suspensions in corresponding state), a következő képlet alapján határoztam meg:

$$WCSSinCS = 100 (V_{sed} - m_s f / \rho_s) / (V_{sed} - m_s f / \rho_s + m_s f)$$

Ahol a víz sűrűsége $\rho_w \sim 1$, a talaj sűrűsége általában $\rho_s = 2,6-2,65$ g/ cm^3 (a nagy szervesanyagtartalom ezt jelentősen csökkentheti, akár $\rho_s \sim 2,5$ g/ cm^3 -ig), az $f = (100 - \text{nedvesség } \%) / 100$.

Megjegyzés: a specifikus üledék térfogat V_{spec} (üledéktérfogat, cm^3 , 1 g légszáraz talajhoz viszonyítva) már önmagában is jellemző érték, így a talajminták ez által is összehasonlíthatóak.

$$V_{spec} = V_{sed} / (m_s (100 - \text{nedvesség } \%) / 100) \quad cm^3/g\text{-ban megadva.}$$

Megjegyzés: A talajmintákhoz az így számolt vízmennyiségnél a minták nedvességtartalmának mennyiségével kevesebb vizet kell adni. Ehhez a talajminták nedvességtartalmát minden egyes talajmintára meg kell határozni, (100 g talajmintát tömegállandóságig hevítjük 105 °C-on), ami akár 10 g/100g is lehet. A szuszpenziókhoz

szükséges talajmennyiséget és a desztillált vizet analitikai mérlegen mértem be, majd keverés után jól záró műanyag edénybe helyeztem őket, és a nedvesedési, duzzadási, szerkezeti egyensúly beállásáig így tároltam. (Czibulya és társai 2008.)

3.2.2. Arany-féle kötöttségi szám meghatározása

Ahogy azt már az irodalmi összefoglalóban is jeleztem, az Arany-féle kötöttségi szám (K_A , $\text{cm}^3/100\text{g}$), kitűnően jellemzi a talajminőséget. A véges minta mennyiség miatt 15 g talajmintát porítottam el dörzsmozsárban, és utána desztillált vizet adagoltam hozzá, míg csomómentesen képlékeny pépet nem kaptam, ezután a minta kis mennyisége miatt, cseppenként adagoltam az desztillált vizet, míg el nem értem a képlékenységi felső határát. A fonalpróbát elvégezve, meghatároztam a plasztikus felső határát. (10. kép) (Az alsó határ nem egyértelműen meghatározható, a teljes plasztikus tartományra jellemző, hogy a szuszpenzió csomómentes, képlékeny pép; a porcelántörőt kirántva a „talajfonál” elszakadása nyomán hegyes kúp keletkezik a pépen és a keverőn egyaránt.) A képlékenységi felső határát akkor értük el, ha a kúp vége visszahajlik, további vízmennyiség hatására a szuszpenzió elfolyósodik. A kapott értékeket átszámoltam az MSZ-08 0205:1978 szabványban megszabott 100g mennyiségű talajmintára.



10. kép Arany-féle kötöttségi szám meghatározása, fonalpróba

3.2.3. Talajszuszpenziók vizsgálata laboratóriumi és terepi körülmények között

A reológiai méréseket HAAKE RS 150 reométerrel végeztem, HAAKE DC 30/K20 termosztát által biztosított 25 ± 0.1 °C hőmérsékleten. Az abszolút folyáshatár meghatározását Vane módszerrel végeztem, FL20 mérőfejjel (12. kép); a folyásgörbéket pedig lap-lap geometriájú PP20Ti mérőfejjel (11. kép), sebesség kontrolált üzemmódban határoztam meg. A mérési eredményeket a RheoWin Data Manager programmal értékeltem.

A fizikai térháló nyírási ellenállását a folyásgörbéket meghatározva széleskörűen jellemezhetjük. Meghatározható a kezdeti maximum (τ_{inimax} , Pa), a tixotróp hurok nagysága ($\Delta\tau_{thixo}$, Pa/s), a Bingham-féle folyáshatár (τ_B , Pa) és a plasztikus viszkozitás (η_{pl} , Pas). (Mezger 2002.) A folyásgörbék meghatározásánál a szuszpenziók tixotróp jellegét, érintésre való érzékenységüket figyelembe véve a mérőfej megközelítését alacsony sebességre (1,25 mm/perc-re) állítottam, hogy a szuszpenzióban kialakult szerkezet mérés előtt ne sérüljön.

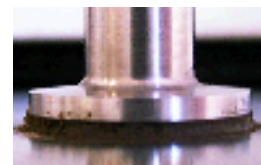
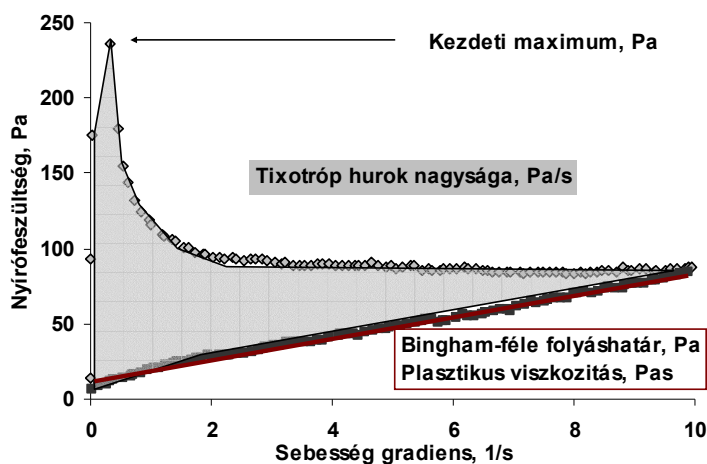
A méréshez szükséges körülbelül 5 g szuszpenziót ugyanezen okokból nagyon óvatosan kellett a mérőtálcára helyezni. A mérőfej-tálca közti távolságot (GAP) pedig 4 mm-re állítottam, így a szuszpenzióba került 1 mm-nél kisebb szálal anyag, magvak, apró kövek nem torlódtak, a mérést nem zavarták. (11. kép) A folyásgörbe méréseket 0,01-10 1/s sebességgradiens ($d\gamma/dt$) értékek közt végeztem, 60 másodpercig növelve (felszálló ág, a továbbiakban üres jelölővel jelölve), majd 60 másodpercig csökkentve (leszálló ág, a továbbiakban teli jelölővel jelölve) a forgási sebesség értékét. Ezzel előbb elfolyósítva a mintát, a fizikai térháló kötéseit elszakítva (a növekvő sebesség gradiens értékeknél), majd a csökkenő értékeknél hagyva a szerkezet visszaépülését, ami azonban a rövid mérés idő alatt nem volt képes regenerálódni.

A folyásgörbék értékelésekor az értékelő szoftverrel meghatároztam a görbék maximum értékét (τ_{inimax} , Pa), a leszállóágból a Bingham egyenlet segítségével az extrapolált, a plasztikus testekre jellemző, Bingham-féle folyáshatárt (τ_B , Pa) és a plasztikus viszkozitást (η_{pl} , Pas):

$$\tau = \tau_B + \eta_{pl}(d\gamma/dt)$$

ahol τ a nyírófeszültség (Pa) és $d\gamma/dt$ a sebességgradiens, (Barnes és társai 1989., 1999.; Mezger 2002.); valamint a felszálló és leszálló ág közötti terület nagyságát ($\Delta\tau_{thixo}$, Pa/s), mely

a tixotrópia mértékét jellemzi. (Barnes 1997.) A folyásgörbe mérésre láthatunk egy példát a következő ábrán. (5. ábra)



5. ábra, 11. kép Folyásgörbék növekvő (felszálló ág, szürke jelölő) majd csökkenő (leszálló ág, fekete jelölő) sebességgradiens értékeknél, a tömény szuszpenziók nyírási ellenállásának bemutatása (bal oldal), PP20Ti lap-lap geometriájú mérőfej (jobb oldal)

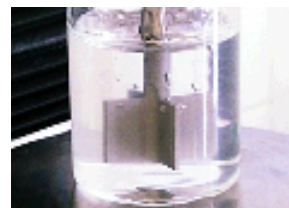
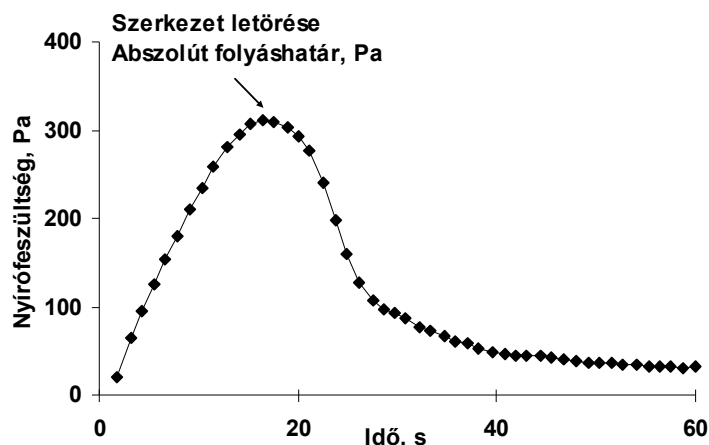
Itt szeretném megjegyezni, hogy a bemutatott görbék felszálló ágának alakja általános és jellemző a tömény talajszuszpenziókra, a két olasz minta kivételével, melyek antitixotrópiát is mutatnak, az összes INDEX mintára ilyen típusú görbét mértem. A kezdeti maximum határozott, a rendszerek jelentős mértékben tixotrópák. Tehát a mérés során a másodlagos kötések először megnyúlnak, majd a egy bizonyos deformáció hatására, elérve a kezdeti maximum értékét, a kötések elszakadnak a szuszpenzió elfolyósodik. A deformáló erő csökkenésének hatására, a mérés ideje alatt nem tud újra felépülni a szerkezet. Ilyen speciális alakú görbét tiszta kaolinite és montmorillonit minták esetén nem sikerült kimutatni (Tombácz és Szekeres 2006., 2004.), viszont mind a huminsav mind a kalciumion (megfelelő arány esetén) jelenléte ilyen görbe alakot produkál (Michéli 2002., Majzik and Tombácz 2007. a., 2007. b.), valószínűleg, mivel ezek jelenlétében a talajokra jellemző térhálózathoz hasonló szerkezet alakul ki az agyagásvány szuszpenziókban. Valószínűsítem, azért nem találtam a talajszuszpenziók tixotrópiájára vonatkozó irodalmat, mivel az ilyen érzékeny rendszerek reológiai eredményeit jelentősen befolyásolja a gondos előkészítés, és a tixotrópia csak így módon mérhető.

A folyásgörbéből számolt reológiai paraméterek közül a kezdeti maximum értéke, a másodlagos kötőerők erősségét jellemzi, és a tixotrópia, mely időfüggő tulajdonság függ legérzékenyebben a minta előéletétől (előkezelés, mintakivétel, tálcára helyezés). Az

inhomogenitások, mint a talajmintákban levő szálak, kis kövek kevésbé befolyásolják a folyásgörbét, mint például a később leírt vane (nyírási-ellenállási görbe) méréseket, mivel a beállított tálcamérőfej távolság úgy optimalizálható (gap: 4mm), hogy a szálak képesek legyenek a felülettel párhuzamosan orientálódni. A leszálló ágra illesztett egyenes tengelymetszete (Bingham-féle folyáshatár, τ_B , Pa és a plasztikus viszkozitás, η_{pl} , Pas) a már leírt szerkezetre jellemző adatot szolgáltat.

A talaj részecskéi közt kialakuló fizikai térháló jellemezhető a vane módszerrel meghatározott abszolút folyáshatár értékével. (Dzuy és Boger 1983., Barnes 1999., Barnes és Nguyen 2001.) Az abszolút folyáshatárt (τ_0 , Pa), mely a részecskék közti kötőerőket jellemzi, a kötések elszakadásához szükséges nyírófeszültséget adja meg. A vane mérőfejet (12. kép) a talajszuszpenzió közepébe helyezve, konstans (nagyon alacsony, 0.1 1/s sebességgradiensnek megfelelő) szögsebességet beállítva, általában 120 másodpercig mértem, 5 mm-es tálcamérőfej (gap) beállítással. A nyírási-ellenállás mérésénél ajánlott, hogy a mérendő minta (illetve a mintatartó edény) átmérője legalább kétszerese legyen a mérőfej átmérőjének. (Dzuy és Boger 1983.) Az általam használt mérőedény ennél néhány mm-el keskenyebb, de az edény mérete a mérőfej elfordulását nem akadályozta meg, és mivel a szuszpenziókat mindig ugyanolyan mérőedényben mértem, az edény mérete miatt keletkező esetleges mérési hibák egyformák. Tehát a nyírási-ellenállási görbén a kötőerők megnyúlására jellemző lineáris rész után a kötések elszakadására (részecskék vagy aggregátumok között) jellemző maximum figyelhető meg. Ezt maximális nyírófeszültség értéket a RheoWin szoftverrel határoztam meg. A következő ábrán talajszuszpenziókra jellemző nyírási-ellenállási görbékre láthatunk példát. (6. ábra).

A nyírási-ellenállási görbék maximuma (abszolút folyáshatár) jelentősen eltér az egyes összehasonlított talajminták esetén. A reprodukálhatóság, a standardizált mérési körülményeket betartva megfelelő volt, általában 5 százalékon belüli az átlagtól való eltérés, egy-két esetben 10 százalék körüli. A minták szitálása ezeknél a méréseknél különösen fontos, hiszen a szálak (gyökérdarabok, fenyőtűk) jelenléte jelentősen befolyásolja a mérési eredményeket, mivel ezek a szálak anyagok véletlenszerűen kerülnek a mintába, illetve a mérőfej lapjai alá, közé.



6. ábra, 12. kép Abszolút folyáshatár meghatározása vane módszerrel, nyírási-ellenállási görbékből (bal oldal), FL20 vane mérőfej (jobb oldal)

Barnes és Nguyen világítottak rá a vane módszer jelentőségére. (Barnes és Nguyen 2001.) Ez a módszer tömény szuszpenziók jellemzésére használatos, főként amelyek jellegzetes tixotrópiát mutatnak. A módszer kohezív talajok, talajmechanikában használt (ASTM Standard, D 2573-94) szabvány alapján való in situ mérésénél használatos (Dzuy és Boger 1983.) Ez a szabvány tartalmazza az úgy nevezett kohéziómérő (angolul: Field Vane Tester) általános leírását, a lágy, szikes, kohezív talajok in situ mérési elveit. A kohéziómérő (Pocket Vane Tester, Eijkelkamp, Agrisearch Equipment) a talaj felső rétegének nyírással szembeni ellenállásának (kohézió) mérésére használható. A talajkohézió talaj szerkezetét, annak erősségét jellemzi. A műszer használata egyszerű: a műszer mérőfejét, a csillagrotort a vízzel telített talajrétegbe nyomva a kohéziómérő felső rugós erőmérő részét addig csavarjuk állandó sebességgel ill. erővel, míg a talajrétegbe merülő mérőfej el nem fordul. A vízzel telített talajréteget, egy védőhálón keresztül, azonos mennyiségű desztillált vízzel való óvatos belocsolással hozzuk létre 50*50 cm-es parcellákon. Meg kell várni, míg a talaj a vizet felszívja az összehasonlíthatóság kedvéért, minden mintázási hely esetén ugyanazt az időtartamot kell kivárni (az általam mért talajok esetén 35 perc), ami alatt a legkevésbé vízvezető/nedvesedő talaj is magába szívja a vizet.

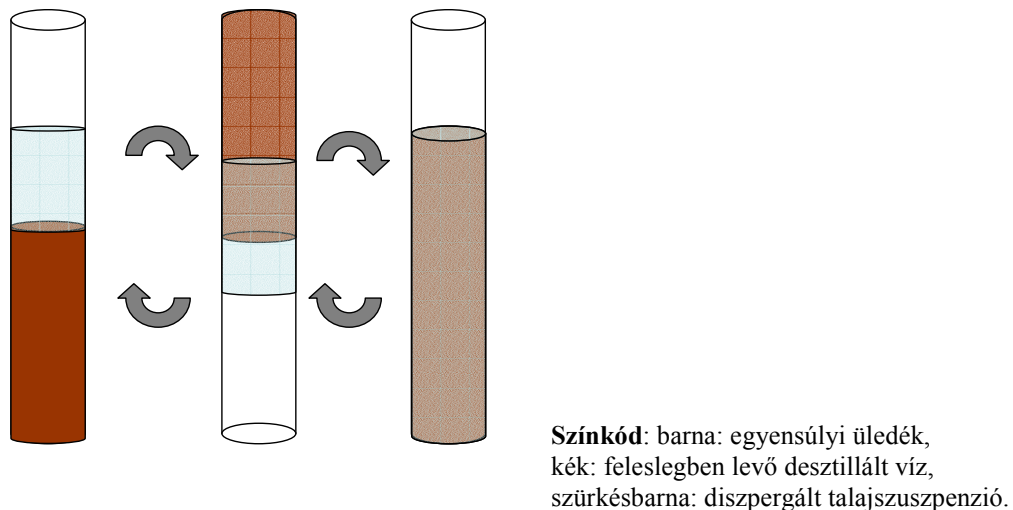


13. kép Kohéziómérő (Pocket vane tester)

A kohéziómérővel (13. kép) a másodlagos kötőerők szakadásához szükséges erőt mérjük, a leolvasott skálaértéket táblázat segítségével kg/cm^2 -re vagy kg/m^2 -re illetve kPa-ra számolhatjuk át. A kellő számú (3-5) mérési eredményt átlagoljuk. A talajtípustól függően különböző mérőfejeket használhatunk, akár 250 kPa-nyi erőt is alkalmazhatunk. Itt fontos megjegyezni, hogy a mért eredményeket nagymértékben befolyásolja az emberi tényező, tehát vagy minden mérést ugyanannak a személynek kell végeznie, vagy ha több személy végzi a vizsgálatot, minden egyes talaj esetén mindegyik személynek legalább 3-5 mérést kell végeznie az átlagolhatóság kedvéért. Párhuzamosan mértem különböző talajszuszpenziók kohézióját (terepen) majd abszolút folyáshatárát (laboratóriumban), és az eredményeket összevetettem.

3.2.4. Rediszpergálhatóság vizsgálata

A rediszpergálhatóság vizsgálatát (14. kép) kémcsőkísérletként végeztem. Minden egyes talajmintából 2 g-ot kémcsőbe mértem, és 4 g desztillált vizet adtam hozzá (így biztosan mindegyik esetben azonos mértékű feleslegben volt a desztillált víz), majd homogenizáltam a szuszpenziókat, üvegbotos keverés és ultrahangozás segítségével. A szuszpenziókat egy hétig állni hagytam, hogy beálljon az egyensúly, a kémcső alján kialakult az egyensúlyi üledék, fölötte pedig megjelent a vízfelesleg; majd határozott mozdulatokkal, addig forgattam a kémcsövet, míg a kémcső alján kialakult egyensúlyi üledék rediszpergálódott.



14. kép. Egyensúlyi üledék rediszpergálása

Ezzel a kiegészítő módszerrel is a talajok kötöttségét kívántam jellemezni, hiszen minél kötöttebb a talaj, annál kevesebb vizet képes felvenni és annál nehezebben rediszpergálható.

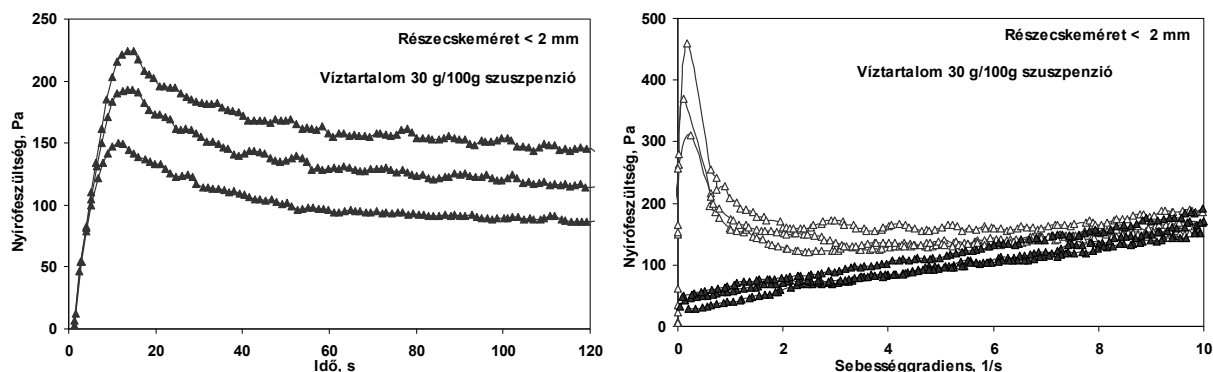
4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

4.1. Előkísérletek, mérési körülmények kidolgozása, a mérést befolyásoló tényezők

4.1.1. Szemcseméret hatása a reológiai paraméterekre

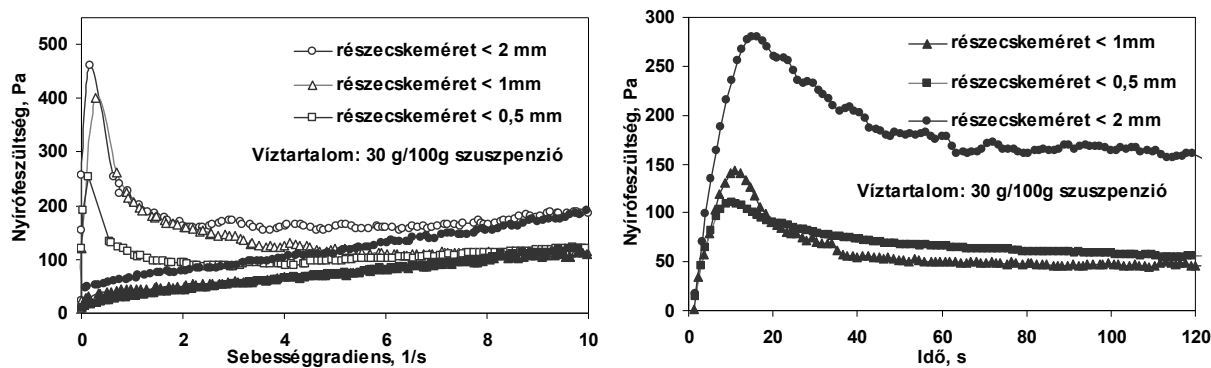
A talajminták szuszpenzió készítés előtt gondos előmunkálatokat igényeltek. Ahhoz, hogy összehasonlítható paramétereket kapjunk, az előkészítés módjának szigorúan meg kellett egyeznie. Bizonyos talajtani vizsgálatokat a talajok 2 mm alatti részecskéivel végzik, ilyen például a talaj víztartalmának, szervesanyagtartalmának és ionösszetételének vizsgálata, kivétel a vízáteresztő-képesség, vagy pórusviszonyok vizsgálata, ilyenkor bolygatatlan mintákat vizsgálnak. (Stefanovits 1975., Oades 1990.) Előkísérleteim során, a 2 mm alatti talajszemcséket kívántam használni a szuszpenzió készítéséhez. Ám a mérések így reprodukálhatatlanok voltak, előfordult 100 százalékos hiba is, melyet a talajokban levő kövek, magvak, szálas anyagok (gyökérdarabok, illetve bizonyos minták esetén fenyőtűk) okoztak. Ezeket el kellett távolítani a talajmintákból ahhoz, hogy reológiaiailag mérhető

szuszpenziót készíthessek belőlük. Ennek megerősítésére megpróbáltam reprodukálni a 2 mm alatti szemcseméretű talajokból készült szuszpenziók reogramjait illetve nyírási-ellenállási görbéit. A következő ábrákon láthatóak a legjobb eredmények. (7. a, b. ábra)



7. a, b. ábra Azonos körülmények közt készített (azonos víztartalom, hőmérséklet, állási idő) 2 mm alatti szemcseméretű talajokból készült szuszpenziók nyírási-ellenállási görbéi (bal oldali ábra) és reogramjai (jobb oldali ábra, növekvő (felszálló ág, üres jelölő), majd csökkenő (leszálló ág, teli jelölő) sebességgradiens értékeknél)

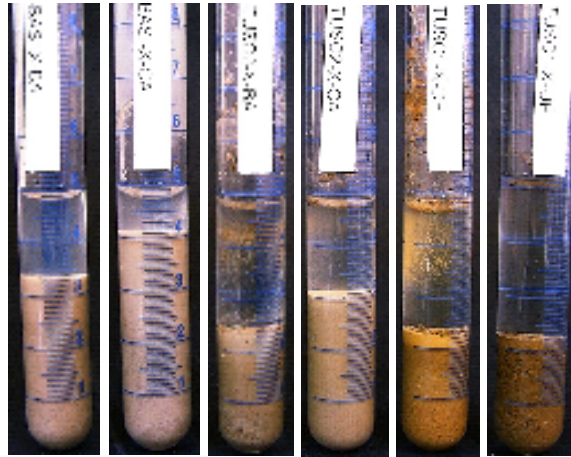
Látható, hogy a maximumokban igen nagy lehet az eltérés, illetve a tixotróp hurok nagysága jelentősen változhat, a folyásgörbék esetén. Tapasztalataim alapján, még a minta előéletétől kevésbé függő, bár homogenitás által jobban befolyásolt nyírási-ellenállási görbékben is igen nagy különbség figyelhető meg, ezzel bizonyítható, hogy nem a minta tárolása, illetve az edényből a méréshez való kivétel okozza a különbséget, hiszen e mérés közben a minta a tárolóedényben marad. Hasonló problémával szembesültek Or and Ghezzehei. (Or és Ghezzehei 2002., Ghezzehei és Or 2001.) Ezt a problémát úgy oldották meg, hogy a talajminták 1 mm alatti szemcseméretű talajfrakcióit használták a különböző víztartalmú szuszpenziók készítésre. A légszáraz talajmintákhoz megfelelő mennyiségű desztillált vizet adagoltak (ez minden minta esetén más koncentrációt jelent), és az egyensúly beállásáig 48-72 órán át hagyták állni a rendszert. Bizonyítandó, hogy a rossz reprodukálhatóság oka a szemcseméret szerinti ülepedés, a mintákat különböző, 0,5, 1, 1,5 és 2 mm-es szitafrakciókra választottam szét, és ezekből készítettem szuszpenziókat.



8. a, b. ábra 2, 1 és 0,5 mm alatti szemcseméretű talajokból készült szuszpenziók nyírási-ellenállási görbéi (bal oldali ábra) illetve reogramjai (jobb oldali ábra)

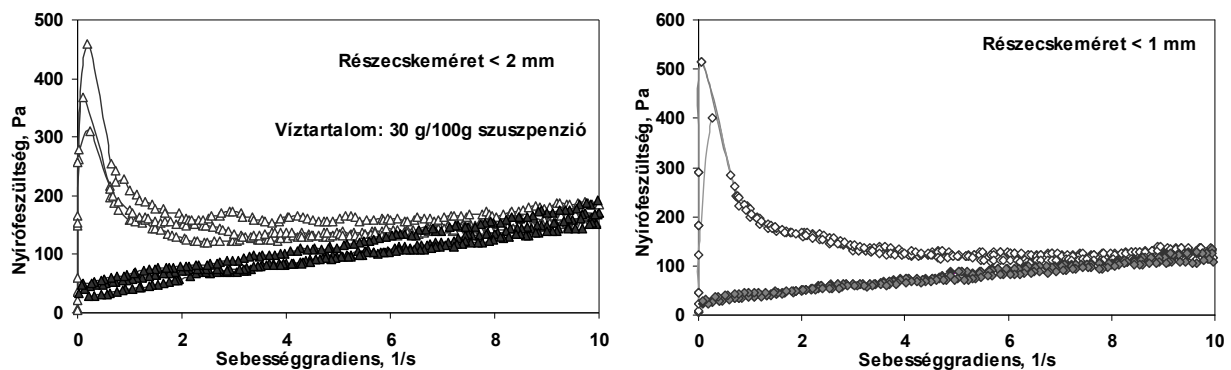
Összehasonlítva az egyes frakciók folyásgörbéit, illetve nyírási-ellenállási görbéit (8. a, b. ábra) belátható, hogy a 2 mm alatti szemcseméretű talajokból készült szuszpenziók reológiai mérései, a szemcseméret szerinti ülepedés miatt, nem lehetnek reprodukálhatóak. Az egyes frakciókból készült szuszpenziók reológiai mérései alapján a következő következtetéseket vontam le:

A 0,5 mm-es frakció igen kis százaléka (10-20 százalék) volt a mintáknak, ezért, bár a mérések reprodukálhatósága kitűnő volt, kizárólag ennek a frakciónak a használatát elvettem. A 2-1 mm közötti szemcseméretű talajmintákból készített szuszpenzióknál szemcseméret szerinti ülepedést tapasztaltam, már egy napos állásidő után is, ezek reológiai mérésekhez nem használhatóak. Az 1 mm alatti szemcseméret esetén megfelelő volt a reprodukálhatóság, és nem tapasztaltam szemcseméret szerinti ülepedést, ezért ezt a frakciót választottam a reológiai mérésekhez szükséges talajszuszpenziók készítéséhez. A szemcseméret szerinti ülepedést láthatjuk a következő, 15. képen.



15. kép Szuszpenziók szemcseméret szerinti elkülönülése egy hét állás után

A képen megfigyelhető az egy hét állási idő során megjelenő szemcseméret szerinti szeparálódás, mely talajszuszpenzióként különböző mértékű, valamint hogy az egyes szuszpenziók különböző egyensúlyi üledéktérfigattal rendelkeznek. Így e szuszpenziók mérési eredményei nyilvánvalóan reprodukálhatatlanok. Leij, Ghezehei és Or az általuk agyagásványszuszpenziókra felállított modellbe építették be a standard deviáció értékét (Leij, Ghezehei, Or 2002.), valamint 3-5 alkalommal ismételték a méréseket (Ghezehei és Or 2001.), de Markgraf korábbi publikációi nem is utalnak a mérések ismételtetésének mértékére. (Markgraf 2006., 2008. a, b.)



9. a, b. ábra A 2 és 1 mm alatti szemcseméretű talajokból készült szuszpenziók reogramjainak összevetése (növekvő (felszálló ág, üres jelölő) majd csökkenő (leszálló ág, teli jelölő) sebességgradiens értékeknél)

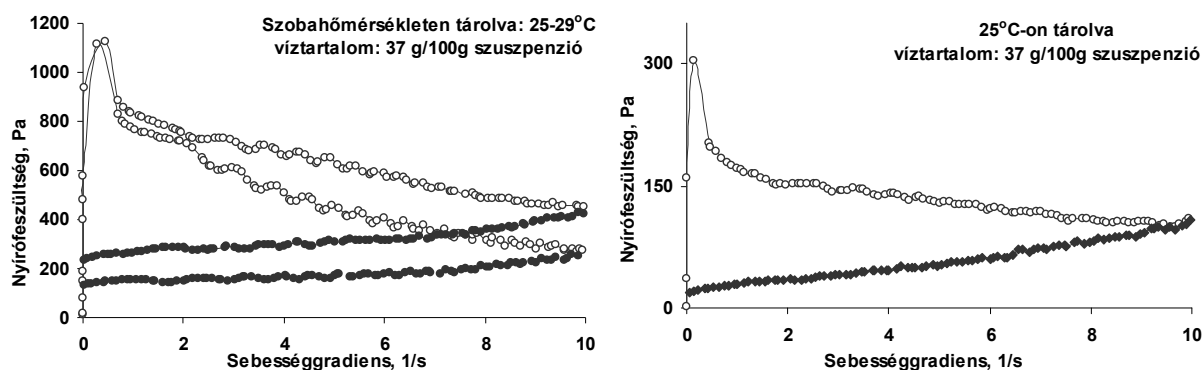
Összevetve a 2 mm alatti frakciókból készült szuszpenziók eredményeivel, az 1 mm-es frakciót mérve igen jó eredményeket kaptam, a görbék maximumában ugyan van eltérés, de a

lefutásuk közel azonos, így az egyes reológiai paraméterek értékei is hibahatáron (20-25%) belül reprodukálhatóak. (9. a, b. ábra) Mivel a reprodukálhatóság megfelelő, és az 1 mm-nél kisebb szemcseméretet tartalmazó frakció a talajminták 60-100 százalékát jelentik, méréseimhez az 1 mm alatti talajfrakciót választottam.

4.1.2. A hőmérséklet hatása a reológiai tulajdonságokra

A szerkezeti stabilitás és vízmegtartóképeség, a részecskeháló érzékenysége, mely külső erők hatására hosszantartó folyamatok révén alakul ki, az úgynevezett tixotróp viselkedés tipikusan jellemző a talajokra. A részecskeháló felépülése időigényes folyamat, így igen hosszú idő szükséges az egyensúlyi állapot eléréséhez.

Elvileg természetes körülmények között végtelen idő áll rendelkezésre, habár bizonyos tényezők, mint a hőmérséklet, csapadék stb. folyamatosan változnak az állási idő során. Először a tárolási hőmérséklet hatását teszteltem, mivel nem termosztált minták esetén rossznak bizonyult a reprodukálhatóság. Hasonló tapasztalatokról számoltak be agyagásvány szuszpenziók esetén Sultan és társai 2000-ben.



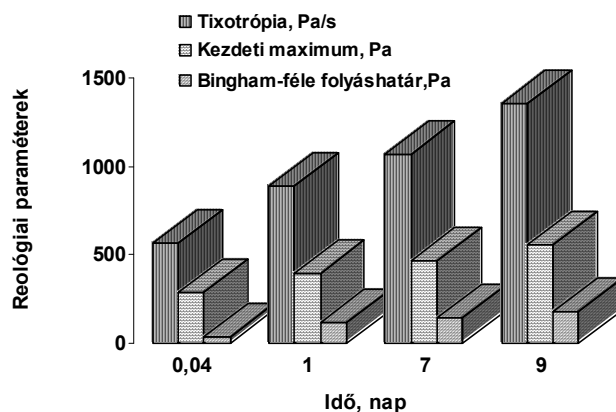
10. a, b. ábra Egy napig szobahőmérsékleten tárolt talajszuszpenziók folyásgörbéi (bal oldali ábra) és az egy napig légkondicionált minták görbéi (jobb oldali ábra) A víztartalom 37 g/100 g szuszpenzióra vonatkoztatva.

A gondosan készített szuszpenziókat szobahőmérsékleten tároltam, a hőmérséklet 25 és 29 °C között változott ezeket hasonlítottam össze 25 °C-on légkondicionált mintákkal. Ahogyan a 10. a. és 10. b. ábrán látható, lényeges különbséget tapasztaltam a termosztált ill. nem termosztált minták folyási tulajdonságai között. A nem-termosztált minták mérésekor a

hőmérséklet magasabb volt, gyorsabban párolgott a szuszpenzió víztartalma, így az egyes mérések közt nagyobb eltérést tapasztaltam, mint a termosztáltak esetén. (10. ábra)

4.1.3. Az állási idő hatása a reológiai tulajdonságokra

Következő lépésként, a talajszuszpenziók fizikai térhálójának ultrahangozás utáni újrakezdéséhez szükséges időt határoztam meg. Ehhez az elkészített talajszuszpenziókat mérés előtt egy illetve három óráig, valamint egytől kilenc napig hagytam állni. A különböző állási idők után meghatározott reológiai adatokat összehasonlítottam. Néhány példa látható a következő, 11. ábrán.



11. ábra A fizikai térháló felépülése állás közben
25 °C-on tárolt és mért tömény szuszpenziók idő-függő reológiai paraméterei
(A víztartalom 32 g/100 g szuszpenzióra vonatkoztatva.)

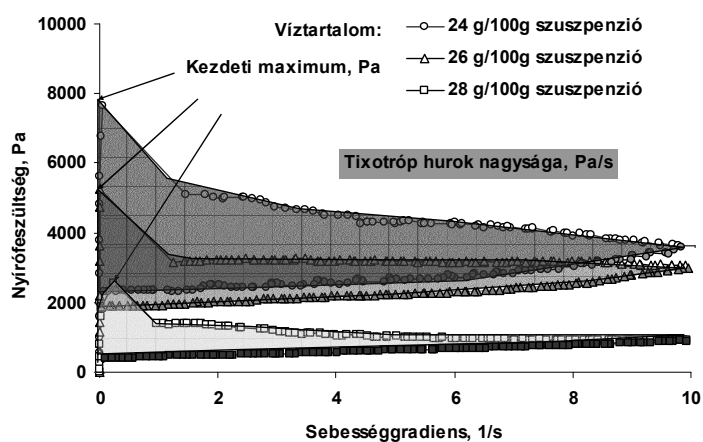
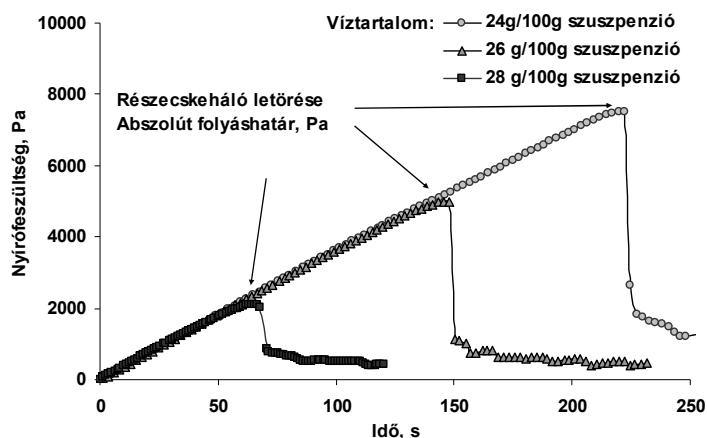
Desztillált víz felesleg jelenlétében készült szuszpenziók részecskeméret szerint spontán frakcionálódtak három illetve több napi állási idő során. A néhány óra állási idő után a mérések reprodukálhatatlanok voltak, mivel a tixotróp térháló nem tudott ennyi idő alatt kiépülni, tehát az egyensúly nem volt képes beállni. Egy illetve két nap állási idő során, ugyan a szuszpenziók nem érték el a tökéletes egyensúlyi állapotot, de néhány óráig nem változott a szerkezet, valamelyest kiépült a tixotróp fizikai térháló, így a mérések kellően reprodukálhatónak bizonyultak. Lényeges, hogy egy-két nap alatt szemcseméret szerinti szeparálódás sem következett be. Ezért választottam az egy napos állási időt, a reológiai paraméterek meghatározása előtt, ami korábban agyagásványszuszpenziók esetén is megfelelőnek (Tombácz és Szekeres 2004., 2006., Majzik és Tombácz 2007.) bizonyult. A

mérések reprodukálhatósága függ a talajszuszpenziók fizikai, kémiai tulajdonságaitól. Bár az ismétlések közti különbség minimalizálható, ha pontosan betartjuk a talajszuszpenziók készítésére, ill. a reológiai mérésekre a módszerek közt közölt instrukciókat. Az ajánlott egy napos állási idő közelíti az irodalomban Ghezzei és társai méréseinél alkalmazott 1-3 napos, a szuszpenzió-egyensúly beállításához szükséges időt (Ghezzei és Or 2001.), ám ebben a cikkben a tixotróp részecskehaló időfüggő újraépülésének fontosságáról nem esik szó, és nem adnak magyarázatot arra sem, miért az adott a részecskeméret választották.

4.1.4. Koncentrációfüggés, szuszpenziók víztartalmának hatása a reológiai tulajdonságokra

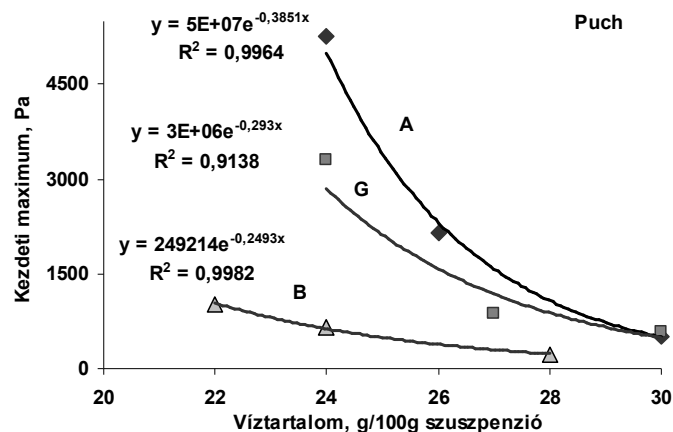
A talajszuszpenziók, mint azt már korábban említettem csak egy bizonyos koncentráció tartományon belül mérhetőek. A legtöményebb szuszpenzió víztartalma, tehát a legkisebb víztartalom, amivel összeállnak a porhalmaz részecskéi, a festékipari vízszám; a legnagyobb víztartalom, amit magában tud tartani a szuszpenzió, az egyensúlyi üledék víztartalma. A szuszpenziókat összehasonlítható állapotban kell mérni ahhoz, hogy az egyes paramétereket összevethessük. Ahogy már fentebb említettem, egyrészt a talajszuszpenziók egy jellemző koncentráció tartományban homogenizálhatóak, másrészt ez a tartomány mintáról mintára más és más.

A vizes szuszpenziók reológiai paraméterei határozott koncentrációfüggést mutatnak, melyet a térfogattört függvényében szokás értékelni. (Barnes és társai 1989., Mezger 2002.) Talajszuszpenziók esetén sajnos a koncentráció reológiai paraméterekre való hatását Markgraf összefoglaló cikke sem elemzi. (Markgraf és társai 2006.) Szignifikáns különbséget láthatunk a bemutatott különböző víztartalmú talajszuszpenzió folyásgörbéiben, illetve a nyírás-ellenállási görbék esetén is. Hiszen a szuszpenzió víztartalma jelentősen befolyásolja a reológiai tulajdonságokat. (12. a, b. ábra)



12. a, b. ábra Talajszuszpenziók nyírási-ellenállási görbéinek (bal oldali ábra) és folyásgörbéinek (jobb oldali ábra) koncentrációfüggése 24, 26 illetve 28 g/100 g víztartalmú szuszpenziók esetén

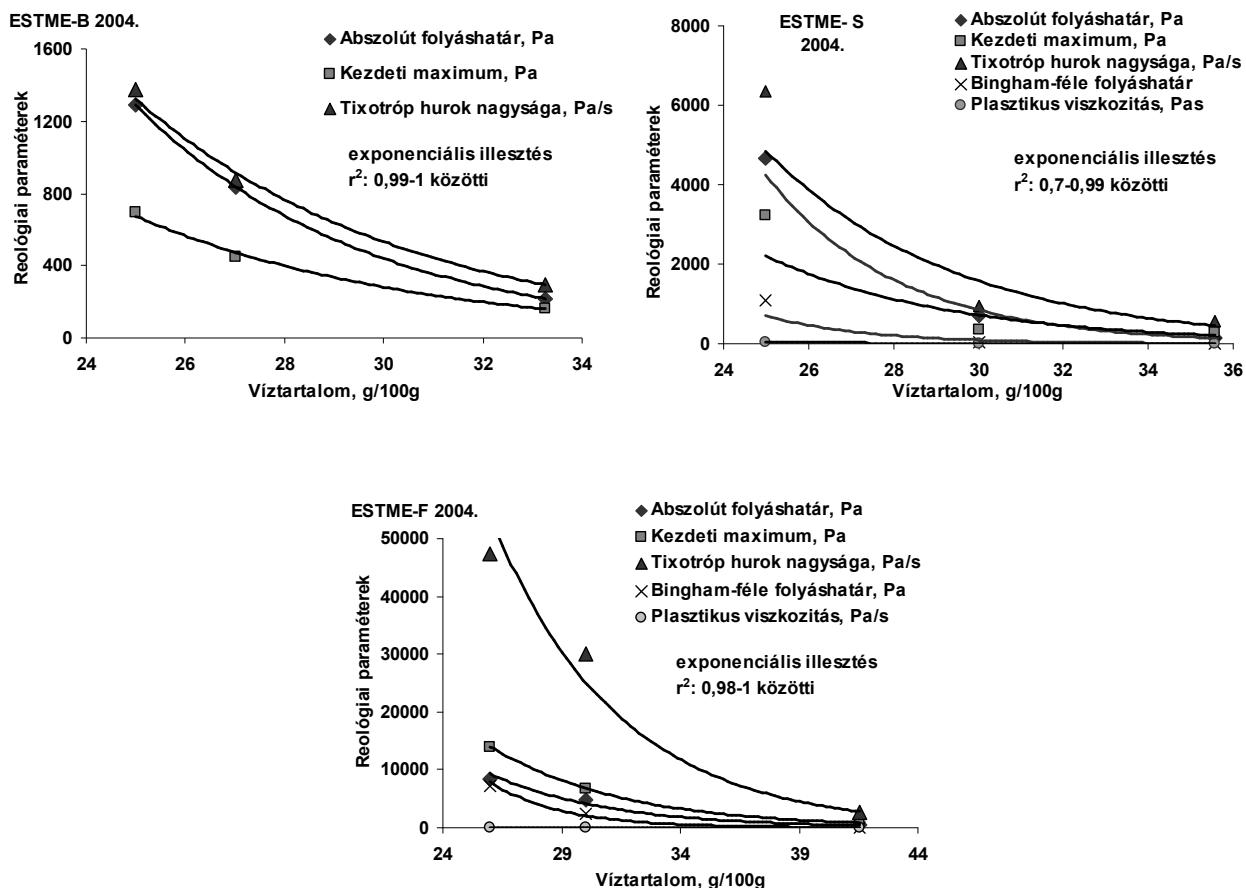
A részecskeháló erőssége, így az azt jellemző reológiai paraméterek (abszolút folyáshatár, kezdeti maximum és a tixotróp hurok nagysága) a víztartalom csökkenésével, így a térfogategységre jutó szilárd részecske tartalom növekedésével, tehát a kötéspontok számának növekedésével nő.



13. ábra A kezdeti maximum koncentrációfüggése. A különböző talajszuszpenziók kezdeti maximuma a víztartalom függvényében

Példaképpen bemutatom a különböző víztartalmú Puch mintákból készült szuszpenziók folyásgörbéiből számolt kezdeti maximumokat (13. ábra). A víztartalom csökkenésével együtt, hasonlóan a folyáshatár és a viszkozitáshoz növekedéséhez, megfigyelhető a kezdeti maximum közel exponenciális növekedése, melyet már korábban más talajszuszpenziók esetén is kimutattak. (Ghezehei és Or 2001.) Habár, az látható, hogy jellegzetes változást tapasztaltam mindegyik talajszuszpenzió esetén a víztartalom változásával, a különböző víztartalmú talajszuszpenziók reológiai paraméterei közt levő lényeges különbség azonban csak 6%-os hibával határozható meg.

Santomera katéna mintái esetén is megfigyelhető az egyes reológiai paramétereknek a víztartalom növekedésével való csökkenése. A 14. a, b, c. ábrán látható hogy a reológiai paraméterek exponenciális függvénnyel jól közelíthetően változnak a víztartalommal. Egyértelmű különbség tapasztalható az egyes minták közt, a legnagyobb változás a tixotróp hurok nagyságában következik be. Az is megfigyelhető, ha az egyes víztartalom értékeknél vizsgáljuk a minták bármely paraméterét, követik a növényi borítottság változása alapján elvárható trendet. $F > S > B$ sorrendben csökkennek a paraméterek. Az F (erdős terület, 100 %-os borítottság) és S (növényzettel 50 %-osan borított) minták esetében nemcsak a hosszú idő alatt kialakuló szerkezetre jellemző három paraméter (abszolút folyáshatár, kezdeti maximum, és tixotróp hurok nagysága) csökken közel exponenciálisan a víztartalom növekedésével, hanem a lenyírt szerkezetre jellemző Bingham-féle folyáshatár és a plasztikus viszkozitás is.



14. a, b, c. ábra Reológiai paraméterek koncentrációfüggése a változó növényi borítottságú Santomera kísérleti terület (F - erdő, S - cserjés és B - kopár) mintái esetén

4.1.5. Mérhető koncentráció-tartomány kiválasztása

4.1.5.1. Azonos víztartalmú szuszpenziók

A talajminták közvetlenül nem jellemezhetőek a reológia módszerével, ezért kidolgoztam az összehasonlítható állapotú szuszpenziók készítése metodikáját.

Először azonos koncentrációjú talajszuszpenziókat kívántam készíteni, és ezek reológiai tulajdonságait vizsgálni, úgy gondoltam ezek összehasonlíthatóak. Sajnos azonos víztartalmú szuszpenziót csak hasonló területről származó, közel azonos ásványi összetételű, szerkezetű és hasonló vízmegtartóképeségű talajmintákból készíthetőek. Előfordulhat, hogy a talajmintához adagolt víz nem elegendő a szuszpenzió homogenizálásához, még erőkefejtéssel sem oldható meg a szuszpenziókészítés, hiszen a minta egy része át sem

nedvesedik; más esetben túl sok a hozzáadott víz, a vízfelesleget a talajminta nem képes megtartani, így az a szuszpenzió tetején jelenik meg. Következésképpen így az összes talajszuszpenziót nem lehet összehasonlítani.

Néhány esetben mégis sikerült azonos víztartalmú talajszuszpenziókat készítenem, illetve mérnem. Az így kapott eredmények mindazonáltal jellemzőek a talajmintákra, az adott körülményeket figyelembe véve egymáshoz való viszonyuk, gyengébb-erősebb szerkezetük, kötöttségük jellemezhető. Természetesen, ha egy-egy talajmintacsoport esetén a homogén szuszpenziók elkészítéséhez szükséges legkisebb víztartamú talajszuszpenzió víztartalmát választjuk, az annál több vizet igénylő minta reológiai paraméterei magasan kiugranak a többi közül, míg a kisebb víztartalommal is homogén szuszpenziót képezőek, sokkal kisebb értékeket mutatnak, tehát az értékek inkább jellemzőek a körülményekre, mint az egyes talajok minőségére. A meghatározott adatokat az 1. táblázatban közlöm.

Hogy milyen esetekben használhatóak ezek az eredmények?

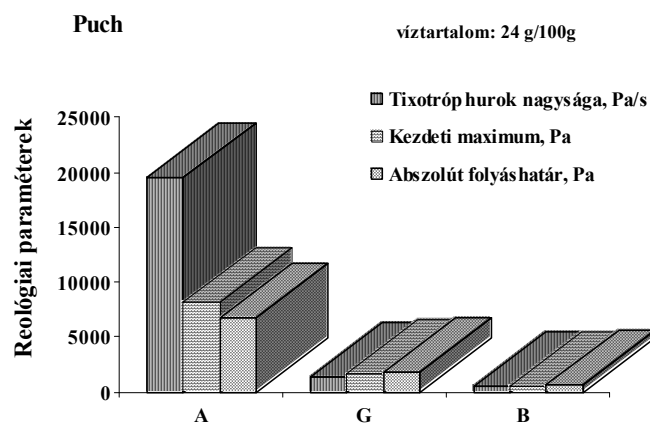
Két esetet szeretnék kiemelni:

- az első esetben az összehasonlítandó talajszorozat minden tagját sikerül azonos víztartalom mellett homogenizálni, és a minták kötöttségének sorrendje követi a talajszuszpenzióban kialakult szerkezet erősségét (ilyen sorozatot alkotnak a német Puch minták)
- a második esetben a sortozatot több részre bontva, kettő vagy több víztartalom mellett sikerült homogenizálni, és részletekben lehetett elemezni a mért és számolt paramétereket (ilyenek az olasz Basilicata és Tuscany terület mintáiból készült szuszpenziók, a spanyol Santomera és az El Aguilucho katéna szuszpenziói)

1. Táblázat Az azonos víztartalmú szuszpenziók (2004. évi minták) reológiai paramétereinek összevetése. A szuszpenzió víztartalma H_2O g/100g szuszpenzióra vonatkozva, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbéből számolt paraméterek: a τ_{imax} , Pa a kezdeti maximum, az Δ_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plasztikus viszkozitás.

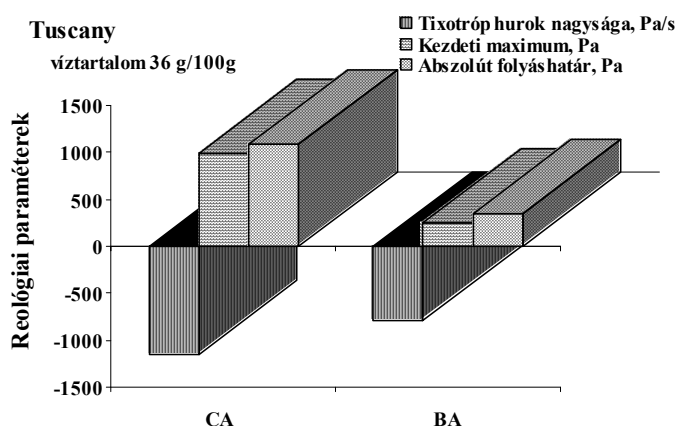
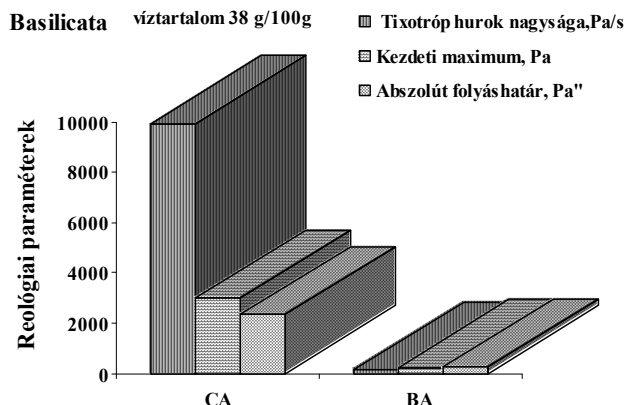
Mintázási helyek	H_2O	τ_0 ,	τ_{imax} ,	Δ_{thixo}	τ_B ,	η_{pl} ,
szuszpenziói	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas
Puch-A	24	6755 ± 800	8199 ± 659	19490 ± 8104	2757 ± 322	135 ± 78
Puch-G	24	651 ± 92	516 ± 27	525 ± 28	51 ± 6	27 ± 6
Puch-B	24	1822 ± 9	1588 ± 173	1325 ± 335	261 ± 34	92 ± 24
Basilicata-BA	38	283 ± 8	246 ± 195	134 ± 195	85 ± 30	79 ± 4
Basilicata-CA	38	2334 ± 378	3025 ± 526	9933 ± 3026	1293 ± 317	204 ± 43
Tuscany-BA	36	342 ± 24	250 ± 23	-790 ± 212	94 ± 23	51 ± 7
Tuscany- CA	36	1081 ± 35	982 ± 40	-1151 ± 373	511 ± 39	157 ± 4
Santomera B	26	623 ± 27	443 ± 79	468 ± 46	38 ± 9	22 ± 8
Santomera F	26	8398 ± 553	13957 ± 510	47283 ± 20799	7200 ± 227	94 ± 37
Santomera S	26	2227 ± 63	2317 ± 430	4737 ± 169	531 ± 131	41 ± 9
Santomera-Fm	28	1870 ± 280	2746 ± 71	4821 ± 256	787 ± 37	48 ± 14
Santomera-Fp	28	8767 ± 2	8243 ± 114	18125 ± 38	3917 ± 231	85 ± 7
El Aguilucho-K	23	1646 ± 65	2697 ± 434	3926 ± 689	134 ± 74	33 ± 9
El Aguilucho-TP	23	596 ± 40	1068 ± 41	1166 ± 124	$17,7 \pm 0,6$	38 ± 2
El Aguilucho-TPm	23	1130 ± 224	3822 ± 703	4088 ± 1308	22 ± 6	8 ± 2
El Aguilucho-TPms	23	977 ± 221	5527 ± 899	5628 ± 746	11 ± 8	$6,7 \pm 0,6$
El Aguilucho-POM	30	584 ± 3	1437 ± 155	2578 ± 252	52 ± 8	13 ± 3
El Aguilucho-TPmOM	30	365 ± 19	481 ± 21	806 ± 126	20 ± 2	7 ± 1

Bár a reológiai paraméterek változásának iránya ilyen körülmények közt is jellemző, a mért paraméterek közti különbség nagysága illetve a paraméterek értékei nem tükrözik hűen a talajszuszpenziók szerkezetének erősségét. Ennek oka, hogy szuszpenziók víztartalmánál mindegyik minta több vizet igényel egyensúlyi állapotban, ráadásul a minták vízmegtartóképessége igen különböző. A magas kezdeti maximum értékek ez esetben a szuszpenzió töménységét jellemzik inkább, tehát a talajszemcsék tömörödésének mértékéről, és nem a szerkezet erősségéről adnak információt. Nyilvánvalóan ilyen állapotban is lenyírható a rendszer, és a deformáció hatására összetört szerkezet ez esetben is jellemezhető a Bingham-féle folyáshatárral, és a plasztikus viszkozitással, de mindig hozzá kell tenni, hogy ez egy kényszerített állapot. Csak az egyes talajszuszpenziók közti különbség az, ami ténylegesen jellemző.



15. ábra. Puch mintákból készült azonos víztartalmú (24 g/100g) talajszuszpenziók folyásgörbéiből és nyírási-ellenállás görbéiből számolt reológiai paramétereinek összevetése (A - normál, G - zöld és B - fekete)

A Puch mintákból készült szuszpenziók esetén (15. ábra) 24 g/100-os víztartalom mellett egyértelműen összehasonlíthatóak az eredmények, hiszen mindhárom minta esetén, bár erőteljes keveréssel, lehetséges volt a homogenizálás. Mint látható a normál mezőgazdálkodási területről származó mintából készült szuszpenzió reológiai paraméterei a legmagasabbak, ezt a rossz és az extrém rossz gazdálkodást modellező területekről származó minták értékei követik, ez a várt trendnek megfelelő. ($A > G > B$)

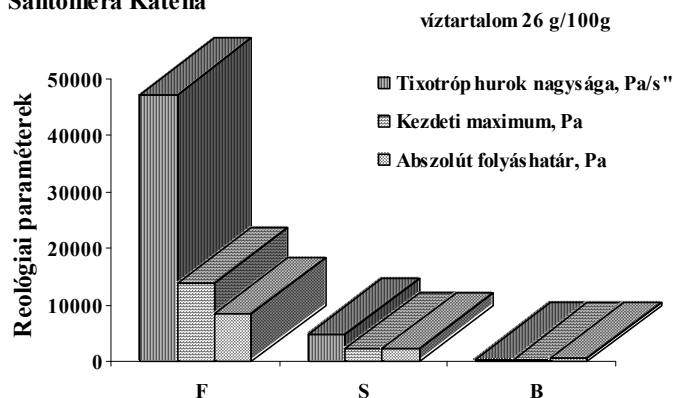


16. a, b. ábra Olaszországból, biológiai (BA) és hagyományos (CA) gazdálkodási területről származó talajmintákból készült szuszpenziók reológiai paraméterei, 38 illetve 36 g/100g-os víztartalom mellett

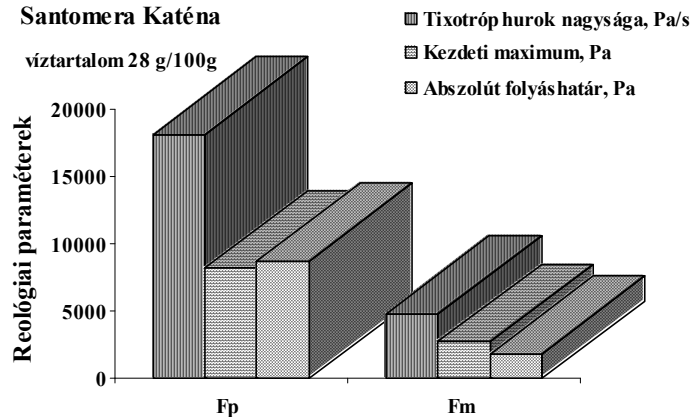
A basilicatai minták (16. a, b. ábra) esetén a szuszpenziókat 38 g/100g-os víztartalom, míg a tuscanyból származó mintákból készíthető szuszpenziókat 36 g/100g víztartalom mellett lehetett homogenizálni. Bár ez esetben is elsősorban a szuszpenziók kötöttségéről kaphatunk információt, az viszont így is egyértelmű, hogy a nagyobb víztartalmú szuszpenziókban a szerkezetet jellemző nagyobb reológiai paraméter értékei erősebb szerkezetre utalnak; tehát a Basilicata területéről származó talajminta erősebb szerkezetet képes kialakítani ilyen víztartalmú talajszuszpenzióban, mint a Tuscany területéről származó minta. A normál mezőgazdasági művelés látszólag kevésbé rombolja a talajszerkezetet, mint a biogazdálkodás, a reológiai paraméterek, így a talajszerkezet erősebbnek mutatkozik. Ez a megállapítás azért helytelen, mert a CA jelölésű talajminták egyensúlyban 7 (Tuscany) illetve 13 (Basilicata) százalékkal több vizet képesek megkötni, mint a (BA) jelzésű bio minták, így a nem egyensúlyi 36 és 38 százaléknyi víztartalom, még messzebb van az egyensúlyi

állapottól, mint a BA jelzésű jelzésű minták esetén, így nem érdemes messzemenő következtetéseket levonni.

Santomera Katéna



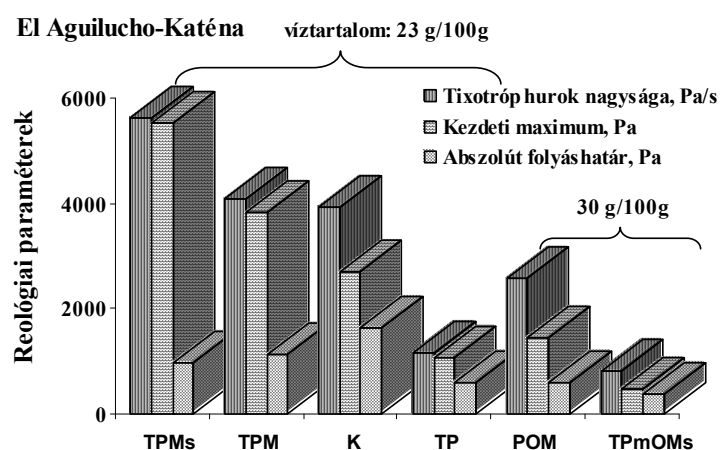
Santomera Katéna



17. a, b. ábra A változó növényi borítottságú (Santomera katéna: F - erdős, S - cserjés, B - kopár, F_p - erdős és F_m - eltávolított erdős) területről származó talajmintákból készült szuszpenziók reológiai paraméterei 26 illetve 28 g/100g víztartalom mellett

A Santomera katéna esetén (17. a, b. ábra) a talajminőség közti különbség az azonos víztartalmú szuszpenziók paramétereiben is megnyilvánul, ahol a növényi borítottság hatását vizsgálták, a természetes (F: erdő) borítottságtól a részleges degradáción (S) át, a kopár (teljesen degradált), lecsupaszított területig (B). A szuszpenziók 26 g/100g desztillált vizet tartalmaztak. A reológiai paraméterek egymással párhuzamosan változva a következő sorrendet adták. A fenyőerdővel borított terület szuszpenziói mutatták a legjobb szerkezetképzési tulajdonságokat. Tehát az aggregált szerkezetű erdős területről származó talajszuszpenziója mutatja a legmagasabb értékeket, a degradált terület, mely növényzetben igen szegény, adta a legalacsonyabb értékeket, míg a közepes (50 százalékos) növényi borítottságú területről származó minta értékei a kettő között helyezkednek el. A következő

ábrán (17. b. ábra) a növényzetmentesítés hatása látható, az erdővel borított terület (Fp) talajából készült szuszpenzió kb. négyszer magasabb reológiai paraméterekkel jellemezhető, mint a növénymentesített (Fm) területé. A szuszpenziók 28 g/100g desztillált vizet tartalmaztak. Elmondható, hogy bár a meghatározott reológiai paraméterek extrém magasak, hiszen a víztartalom 7-15 százalékkal kevesebb, mint amit a talajminták egyensúlyban megtartani képesek, a két minta közti különbség azonos koncentrációjú szuszpenzióik mérésével is látható.



18. ábra Teraszos művelésű remediációs területről (El Aguilucho katéna) származó talajmintákból készült szuszpenziók reológiai paraméterei 23 illetve 30 g/100g víztartalom mellett

A teraszos művelés hatásait figyelhetjük meg az El Aguilucho katéna mintáiból készített 23 és 30 g/100g víztartalmú szuszpenziók esetén. (18. ábra) Nyilvánvalóan csak az azonos koncentrációjú szuszpenziók eredményei hasonlíthatók össze kényszerállapotban. Azért nem azonos víztartalommal készítettem az összes szuszpenziót, mert azok a talajminták, amelyek lényegesen magasabb víztartalmat képesek megtartani egyensúlyban, nem homogenizálhatóak 23 g/100g-os víztartalom mellett. A 23 g/100g víztartalmú szuszpenziók eredményeit összevetve, a kontroll (K) mintához képest csak a TP jelölésű (teraszos, újraerdősített) szuszpenzió gyengébb szerkezetű, a teraszon mikorrhizával kezelt és újraerdősített (TPM), valamint a teraszon mikorrhizával kezelt talajjal javított és újraerdősített (TPMs) mintából készült szuszpenzió bír erősebb szerkezettel. A 30 g/100g koncentrációjú szuszpenziók közül a visszaerdősített, nem teraszos művelésű (POM) területről származó minta szuszpenziója erősebb a teraszos területen mikorrhizával és szervesanyaggal javított

talajjal bekevert, visszaerdősített (TPmOMs) terület szuszpenziójánál. Azt a következtetést vontam le, hogy a teraszos művelés nem feltétlenül javítja a talaj szerkezetét.

4.1.5.2. Összehasonlítható állapotú szuszpenziók, mérhető koncentrációtartomány

Ahhoz, hogy mérhető talajszuszpenziókat kapjunk, megfelelő talaj/víz arányú szuszpenzió készítése szükséges, ami egy szűk koncentráció tartományt jelent, mely minden egyes talaj esetén más és más.

A vízsók és az egyensúlyi üledékek víztartalma is jelentősen különbözött az egyes talajmintákra. Az egyensúlyi üledékekben kialakuló térháló nagymértékben függ a kolloid paraméterektől, így befolyásolja az ásványi összetétel, a részecskék mérete és alakja valamint a részecskék és a pórusok (mikro és makro) elhelyezkedése a talajaggregátumokban. A mikro- és makroaggregátumok kialakulását (Bachmann 2007.) befolyásolják a felület töltése, a talaj részecskéinek határfelületi tulajdonságai (az adszorpciós réteg), valamint a talajoldat tulajdonságai (pH, ionok minősége és összetétele). Éppen ezért tételeztem fel, hogy az aggregált részecsketérhálóba, az egyensúlyi üledékbe zárt víztartalom jellemzi a talaj minőségét. Az egyensúlyi üledékekkel, mint talajokra jellemző összehasonlítható állapotokkal (a különböző víztartalmakat indikátorként használva) kívántam jellemezni a különböző minták közti különbségeket. Az USDA szerint (<http://soils.usda.gov/sqi/concepts/glossary.html>) a talajminőséget jelző indikátor kvantitatív vagy kvalitatív mérést jelent, mely valamely talajfunkciót jellemzi. Megfelelően érzékeny a változásra, mindamellett jellemzi a talajban folyó mechanizmusokat, lehetőségekhez mérten olcsó, használata egyszerű és praktikus. Az indikátorok csoportosítása általában biológiai, kémiai és fizikai indikátorokként történik.

Az összehasonlítható állapotban levő talajszuszpenziók víztartalma (WCSSinCS), a részecske hálóban megkötött maximális, legnagyobb mérhető víztartalmat jelenti. Tehát a talajrészecskék aggregált hálózata nem képes több vizet megtartani. Ennél nagyobb víztartalom esetén a vízfelesleg (talajszemcséket tartalmazó vagy nem tartalmazó) kiválását tapasztaltam az állás során.

4.2. Egyensúlyi üledék készítése

Homogén szuszpenziókat, úgynevezett egyensúlyi üledékeket, számolt mennyiségű talajmintából és desztillált vízből készíthetünk. Az egyensúlyi üledék víztartalmát befolyásolja a talaj ásványi összetétele, szemcsemérete (méreteloszlása) és alakja, valamint a talajaggregátumok részecskéinek és pórusainak (mikro- és makropórusok) elhelyezkedése.

Az összehasonlítható állapotban levő talajszuszpenziók előállítása során 20-40 g talajt (<1 mm alatti szitafrakció) és számolt mennyiségű (10-20 ml) desztillált vizet (figyelembe véve a talajminták nedvességtartalmát) egy jól zárható műanyagedénybe mértem, néhány percig üvegbottal kevergettem, majd 10 másodpercre ultrahangos kádba helyeztem. A keverési folyamatot megismételtem. Az edényt zárva tartottam, csak a keverések idejére nyitottam ki. A levegő buborékok eltávolítása érdekében, a műanyagedényt néhányszor az asztalhoz kocogtattam. Majd lezárva 25 °C-on légkondicionált teremben 24 óráig állni hagytam a mintákat. Az elkészült szuszpenziók megfelelő edényben való tárolása ugyanolyan fontos, mint a szuszpenzió-készítés. A szuszpenziók víztartalma a mérésig nem változhat, hiszen a párolgási vízveszteség jelentős növekedést okoz a reológiai paraméterekben, mert a mérési tartományban a szuszpenziók koncentrációjával meredeken változnak a reológiai paraméterek. Ezért fontosnak tartottam a mérés után, a mért szuszpenziók maradékának a koncentrációját leellenőrizni. Ezt a szuszpenzió pontosan bemért részletének súlyállandóságig, 105 °C-on való szárításával (szárítószekrényben, nyitott csiszolatos bemérőedényben), majd exsikkátorban való lehűlés (bezárt mérőedényben) után a tömeget ismételten lemérve és ebből víztartalmat számolva ellenőriztem.

4.2.1. Az egyensúlyi üledékek víztartalma, WCSSinCS, mint talajminősítő paraméter

Az így meghatározott víztartalmak (WCSSinCS) segítségével jellemezhető a talajok minősége, hiszen a WCSSinCS értéke párhuzamosan változik vízmegtartóképességgel (WHC), így az egyszerűsítve meghatározott vízmegtartóképességgel (WHC*, a 100 g talaj által megtartott víztartalom www.soil-index.com, Szegi és társai 2006., Bastida és társai 2008. a.) is. Tehát minél nagyobb a talajminta WHC értéke, annál magasabb az összehasonlítható állapotban levő talajszuszpenzió WCSSinCS értéke.

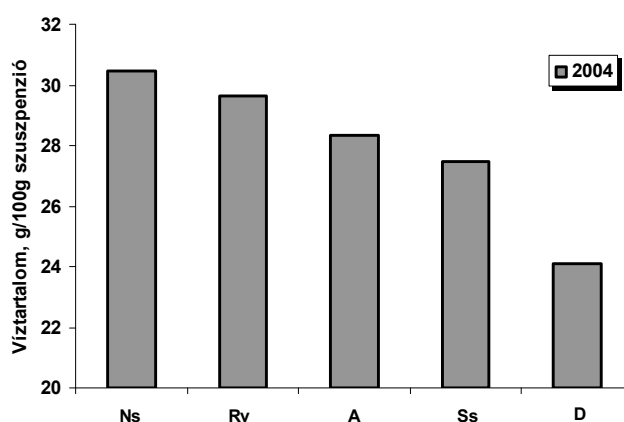
Általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb a WCSSinCS értéke, annál jobb a talaj minősége, az érték 20-60 g/100 g között változik tapasztalataim szerint. A minimális víztartalomnál a szilárd részecskék térfogattörtje legalább ($\phi_s \sim 0.6$), ami nagyon közel van a szuszpenziók maximális térfogattörtjéhez, ami ϕ_s 0.65 az azonos alakú és méretű, legjobban illeszkedő részecskék üledékében. Ez a felső elvi határ, az INDEX minták esetén nem tapasztaltam ennél magasabb értéket. Általánosságban elmondható, hogy minél nagyobb a talajszuszpenzió víztartalma, annál gyengébb a részecskék térhálója, illetve a talaj deformáció szembeni ellenállása (Lapen és társai 2004.), tehát a szuszpenzió elfolyósodik, egy bizonyos víztartalom felett. Másrészt, amint említettem minél nagyobb a WCSSinCS (g/100g szuszpenzióra vonatkoztatva) illetve a WHC értéke annál jobb minőségű a talaj, annál több növényt képes vízzel ellátni. Tehát a talajszuszpenziók összehasonlítható állapotban meghatározott reológiai paraméterei nem korrelálnak közvetlenül a talajok szerkezetének minőségével, így a reológiai paraméterek segítségével csak a talajszuszpenzió szerkezetének erősségét ellenkező irányba befolyásoló víztartalom figyelembevételével állíthatunk fel sorrendet. Korábban hasonló problémát tapasztaltak a talajokat modellező agyagásványszuszpenziók esetén. (Tarchitzky és Chen 2002., Or és Ghezzehei 2002., Neaman és Singer, 2004.)

A egyensúlyi üledékek víztartalma (WCSSinCS, víz g/100g szuszpenzióra vonatkoztatva) alapján felállíthatunk egy sorrendet a talajmintákra:

WCSSinCS, g/100g	<28-30	30-40	>40*
talajminőség	gyenge	normál	jó

* a magas szervesanyagtartalom, vagy agyagásványtartalom; de akár a magas sótartalom is okozhatja

Példaképpen egy magaslat talajmintáiból készült egyensúlyi üledékeinek víztartalmait ábrázoltam. (16. kép és 19. ábra) Ebben a kateóriában a talajminőség a gyenge (kimerített, és degradált) és a közepes (északi lejtő, fenyővel újraerdősített, déli lejtő talaja) között változik.



16. kép és 19. ábra Egy lejtős terület, (Carcavo katéna, Spanyolország) minőségének jellemzése a talajmintákból készült egyensúlyi üledékeinek víztartalmai alapján (Rv (Revegetated): fenyővel újraerdősített, Ns (north slope): északi lejtő, Ss (south slope): déli lejtő, A (abandoned): kimerített és D (degraded): degradált minta talaja)

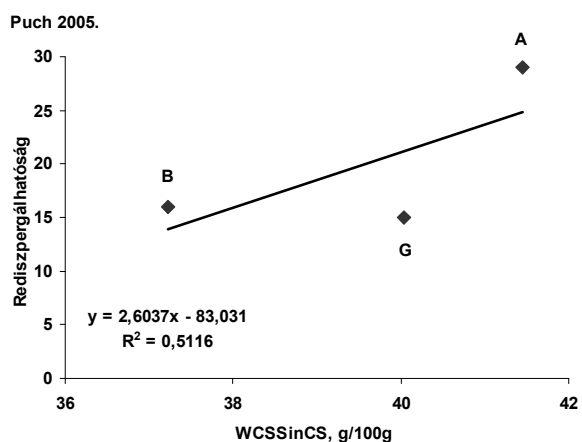
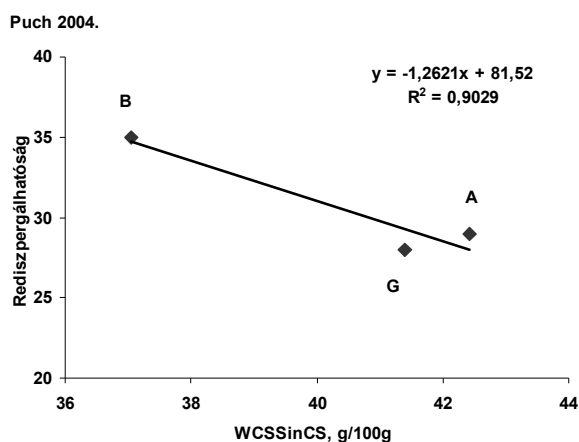
Látható, hogy a legmagasabb vízmennyiséget az északi lejtő talaja illetve az újrafenyősített terület talaja képes megkötni (WCSSinCS értékük 30-29 g/100g), amit feltételeztem is, hiszen az északi lejtőn nem jellemző a heves esőzések miatt kialakuló erózió, az erdős területen pedig a fák gyökerei összefogják a talajt, javítják a szerkezetet, valamint az elpusztult fák, szervesanyaggal látják el a talajt, így javítják annak minőségét. (Golchin 1996., Ingelmo és társai 1998., Moreno-de las Heras 2009.) A déli lejtőn az eső erodeáló hatása jelentős, így az esőcseppek erőteljesen rontják a szerkezetet, kimossák a tápanyagot, ezért várható, hogy kevesebb vizet képes felvenni, ennek WCSSinCS értéke a kiaknázott (tápanyagban szegény) talajéhoz hasonló. A legalacsonyabb WCSSinCS értéke a degradált mintából készült egyensúlyi üledéknek van, ami egyezik a várt tendenciával.

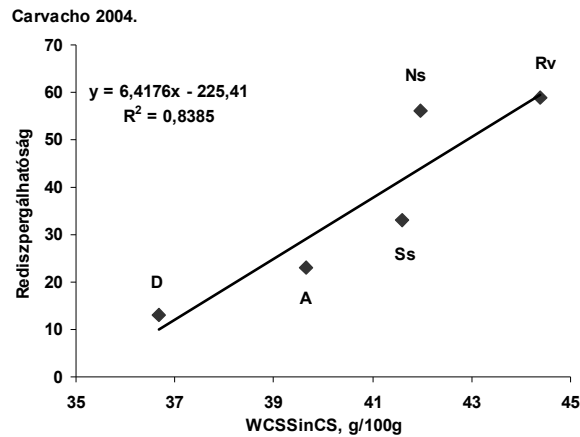
Területi monitorozás esetén a WCSSinCS értékének növekedése a talajszerkezet javulását jelzi. A különböző területeket összehasonlítására, csak hasonló ásványi összetétel esetén ajánlott. Ismételten felhívnom a figyelmet, hogy mivel a szuszpenziók víztartalma nagy mértékben befolyásolja a szerkezetet, így a reológiai tulajdonságokat is, nem lehet figyelmen kívül hagyni a reológiai paraméterek értékelésekor. A reológiai paraméterek és a szerkezet erősség összefüggése tehát nem feltétlenül közvetlen, értékeléskor a reológiai paramétereket az egyensúlyi üledékek víztartalmával együttesen kell figyelembe venni.

4.3. A talajok jellemzése egyszerű módszerek segítségével

4.3.1. Rediszpergálhatósági vizsgálatok

A szuszpenzió rediszpergálhatósága jól jellemzi a talajok kötöttségét. Ez egy egyszerű kémcsőkísérlet, ennek alapján egy fordítottan arányos reláció várható az általam meghatározott, összehasonlítható állapotban a szuszpenzióra jellemző víztartalom értékekkel, hiszen az erősen kötött talaj kevesebb vizet képes megtartani és nehezebben rediszpergálható. Sajnos az egyes minták közti különbségek nem minden esetben mutatták az elvárt trendet. (20. a, b, c. ábra) Így az egyensúlyi üledékek szuszpenzióinak víztartalmával is csak néhány esetben találtam korrelációt. Ráadásul még e ritka esetekben sem mindig elvártak megfelelőek az eredményeim.



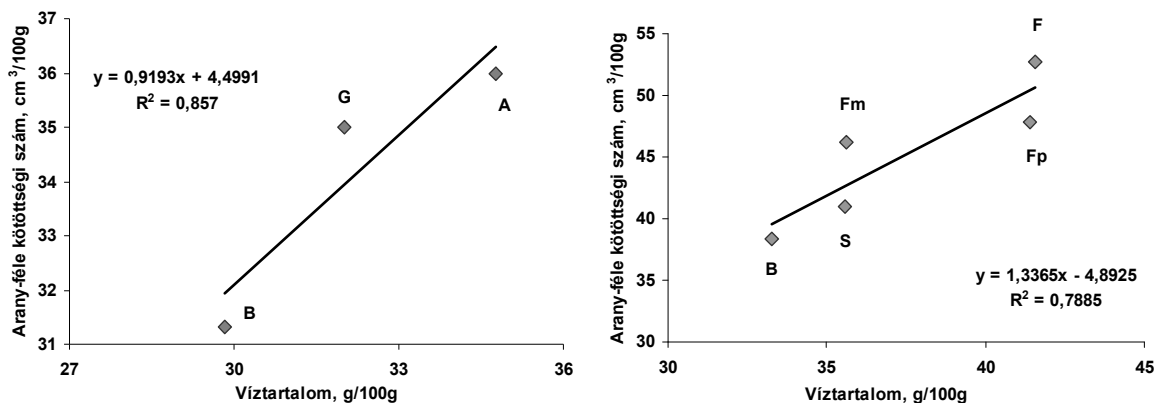


20. a, b, c. ábra A rediszpergálhatóság és az egyensúlyi üledékek víztartalmának összehasonlítása Puch és a Carvacho minták esetén

A 2004-es Puch minták esetében a WCSSinCS értékek növekedésével a rediszpergálhatóság csökkenését tapasztaltam, míg a 2005-ös minták esetén az ellenkezőjét. A Carvacho katéna mintái esetén WCSSinCS értékek növekedésével a rediszpergálhatóság növekedését tapasztaltam. Tehát ez a módszer nem megfelelő sem a talajminták kötöttségének, sem szerkezeti erősségüknek jellemzésére, az eredmények nem mutattak sem releváns különbséget, sem szisztematikus sorrendet.

4.3.2. Arany-féle kötöttségi szám meghatározása

Az Arany-féle kötöttségi (K_A) számot régóta használják, a magyar talajok minőségének jellemzésére. (Stefanovits 1975., Oads 1990., Buzás 1993., MSZ-08 0205:1978.) Feltételeztem, hogy a módszer egyéb talajok esetén is alkalmazható. Ezen egyszerű vizsgálat párhuzamos elvégzésével szándékoztam alátámasztani az általam meghatározott WCSSinCS értékek talajindikátorként való alkalmazhatóságát.



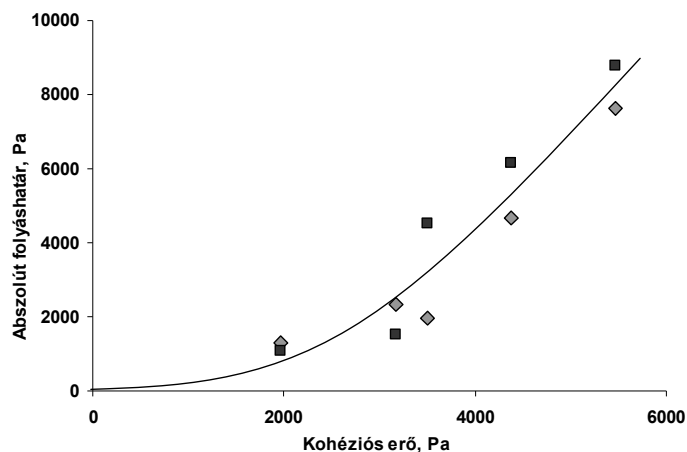
21. a, b. ábra Arany-féle kötöttségi szám és az egyensúlyi üledékek víztartalmának viszonya (Puch 2004 - bal oldal, Santomera 2004 - jobb oldal)

Mivel feltételeztem, hogy a K_A korrelál az általam meghatározott WCSSinCS értékekkel, ezért néhány minta esetén meghatároztam ezt a paramétert és összehasonlítottam az egyensúlyi üledékek víztartalmával. Amint a 21. a, b. ábrák mutatják közel egyenes arányú az összefüggés a két paraméter között. A 2004-es Puch minták esetében a vártak megfelelően, a B jelzésű minta kötöttségi száma bizonyult a legkisebbnek, és az A a legmagasabbnak. A Santomera katéna minták Arany-féle kötöttségi száma közelítőleg egyenes arányosság szerint növekszik az összehasonlítható állapotban meghatározható víztartalmakkal, tehát a nagyobb növényi borítottságú terület talajának magasabb az Arany-féle kötöttségi száma. A víztartalom (WCSSinCS) párhuzamos változása a megbízható minőségjelző kötöttségi számmal (K_A) jól alátámasztja azt a kijelentést, miszerint a WCSSinCS értékek alapján minősíthetjük a talajokat.

4.3.3. Kohéziós erő összevetése az abszolút folyáshatárral

Az Eijkelkamp cég által gyártott kohéziómérővel a talajok legfelső rétegében mérhető a talajmátrix részecskéi közti kohéziós erő. Böhm és Gerold 1995. korábbi tanulmányai bizonyították, hogy a kohéziós erő jellemzően változik a különböző típusú talajhasználat során. Ugyanazon talajmintákra párhuzamosan végeztem terepen kohéziómérést, és laboratóriumi körülmények közt meghatároztam az abszolút folyáshatárukat. A kohéziós erők jól korrelálnak az abszolút folyáshatár értékekkel, amint az a 22. ábrán is látható. Megállapítottam, hogy a terepi kohéziómérővel meghatározható paraméter információval

szolgál a talajok szerkezeti stabilitásáról, és a nyírással szembeni ellenállásról adott körülmények közt.



22. ábra A kohéziómérővel meghatározott kohéziós erő és a reométerrel meghatározott abszolút folyáshatár közti összefüggés néhány magyar talajmintából készült szuszpenzió esetén

4.4. Egyensúlyi üledékek vizsgálata

4.4.1. Egyensúlyi üledékek minősítése víztartalmuk által

A szuszpenziók szerkezetének erősségét, folyási tulajdonságait erőteljesen befolyásolja a víztartalmuk. A talajszuszpenziók reológiai méréseinél nagyon fontos a szuszpenzió koncentrációja, mivel a mért paraméterek a talajszuszpenziók fizikai térhálójának erősségét jellemzik. Általánosságban elmondható, hogy minél magasabb az összehasonlítható állapotban mért szuszpenzió (egyensúlyi üledék) víztartalma, annál alacsonyabb a reológiai paraméterek értéke; hiszen a térfogategységenkénti részecskeszám csökken, így a részecskék közti kötések száma, mely részecskeháló nyírási ellenállásával arányosan változik, szintén csökken. Az összehasonlítható állapotban a szuszpenziókra jellemző víztartalmakat (WCSSinCS) a 2. a, b. táblázatban adom meg.

2. a. Táblázat Az összehasonlítható állapotban levő szuszpenziók víztartalmának (WCSSinCS), és a talajok egyszerűsített vízmegtartóképességének (WHC*) összehasonlítása (a WCSSinCS és a WHC* értékek a www.soil-index.com-on találhatóak); mezőgazdasági kísérletek, és növényi borítottság változásának hatásai

Egyensúlyi üledékek	WCSSinCS	WHC*	WHC*
2004. évi minták	g/100g szuszpenzióra	g/100g talajra	g/100g szuszpenzióra
Mezőgazdasági kísérletek	vonatkoztatva	vonatkoztatva	vonatkoztatva
Puch-A	34,8 ± 0,1	72,5 ± 1,5	42,0
Puch-G	32,0 ± 0,3	68,0 ± 0,8	40,5
Puch-B	29,8 ± 0,2	64,2 ± 0,8	39,1
Basilicata-BA	47,7 ± 0,2	70,5 ± 1,3	41,4
Basilicata-CA	60,1 ± 0,3	70,7 ± 0,7	41,4
Tuscany-BA	41,3 ± 0,9	68,3 ± 1,0	40,6
Tuscany-CA	48,0 ± 0,2	69,6 ± 0,6	41,0
Növényi borítottság	változásának hatása		
Santomera-B	33,3 ± 0,5	74 ± 5	42,5
Santomera-F	41,5 ± 0,6	79,1 ± 0,2	44,2
Santomera-S	35,6 ± 0,1	77,1 ± 0,3	43,5
Santomera-Fm	35,6 ± 0,2	67,3 ± 0,8	40,2
Santomera-Fp	41,4 ± 0,1	67,1 ± 0,3	40,2

2. b. Táblázat Az összehasonlítható állapotban levő szuszpenziók víztartalmának (WCSSinCS) és a talajok egyszerűsített vízmegtartóképességének (WHC*) összehasonlítása (a WCSSinCS és a WHC* értékek a www.soil-index.com-on találhatóak); talajjavítási kísérletek hatásai

Egyensúlyi üledékek	WCSSinCS	WHC*	WHC*
2004. évi minták	g/100g szuszpenzióra	g/100g talajra	g/100g szuszpenzióra
Talajjavítási kísérletek			
El Aguilucho-K	26,2 ± 0,2	64,4 ± 1,4	39,2
El Aguilucho-P	23,8 ± 0,0	60,2 ± 0,9	37,6
El Aguilucho-POM	29,6 ± 0,1	65,5 ± 0,7	39,6
El Aguilucho-TP	30,7 ± 0,4	66,6 ± 0,8	40,0
El Aguilucho-TPm	21,6 ± 0,1	66,2 ± 2,7	39,8
El Aguilucho-TPMs	21,9 ± 0,3	65,6 ± 0,4	39,6
El Aguilucho-TPOM	31,0 ± 0,5	68,7 ± 1,3	40,7
El Aguilucho-TPmOM	28,6 ± 0,1	67,6 ± 0,4	40,3
El Aguilucho-TPOMMs	32,4 ± 0,0	69,7 ± 0,5	41,1
Tres Caminos RFM	29,5 ± 0,7	68,3 ± 1,2	40,6
Tres Caminos RF	30,9 ± 0,4	67,4 ± 0,7	40,3
Tres Caminos S	28,5 ± 0,3	67,8 ± 0,4	40,4
Tres Caminos C	37,3 ± 0,0	68,0 ± 0,7	40,5
Tres Caminos SS	36,3 ± 0,1	68,7 ± 0,5	40,7
Tres caminos K	28,7 ± 0,4	68,2 ± 1,2	40,5
Tres Caminos HE	29,9 ± 0,3	68,1 ± 1,0	40,5
Abanilla 2.0% OM	34,9 ± 0,2	70,0 ± 0,5	41,2
Abanilla 1.5% OM	33,2 ± 1,3	67,1 ± 1,0	40,2
Abanilla 1.0% OM	33,8 ± 0,3	66,3 ± 1,1	39,9
Abanilla 0.5% OM	33,9 ± 0,2	68,2 ± 1,1	40,5
Abanilla 0.0 % OM	30,8 ± 0,3	65,3 ± 1,0	39,5

Amint azt a **4.2.1. Az egyensúlyi üledékek víztartalma, WCSSinCS, mint talajminősítő paraméter** részben taglaltam, az egyensúlyi üledékek víztartalma alapján is minősíthető a talaj. Amennyiben 28-30 g/100g alatti az egyensúlyi üledékek szuszpenzióra

vonatkoztatott víztartalma rossz, ha 30-40 g/100g közötti közepes, 40 g/100g felett jó kategóriába sorolható.

Az összehasonlítható állapotú szuszpenziók víztartalmát figyelembevéve 2004-es Puch minták közül a B (extrém rossz gazdálkodási területről származó) jelű, a Tres Caminosi mintákból a K (kontroll), RFm (a mikorrhizával beoltott újraerdősített minta) és S (magkeverék adagolás); illetve az El Aguilcho minták nagy része rossznak minősíthető, kivételt képeznek a POM (fenyősített, és szervesanyaggal javított), TP (teraszos területen újrafenyősített), TPOM (teraszos, fenyves területen szervesanyag hozzáadással javított), TPOMMs (teraszos, fenyves területen szervesanyag és talajba kevert mikorrhiza hozzáadással javított), melyek közepes minőségűek. Az Santomera B (kopár), S (cserjés) és Fm (eltávolított erdő) minta és az Abanilla katéna területéről mintázott valamennyi minta, valamint többi Puch (A (normál gazdálkodás), G (rossz gazdálkodás)) és Tres Caminos HE (humoenzim adagolás), (Rf (újraerdősített), Ss (szennyvíziszappal kezelt), C (komposzttal javított) minta közepes vízmegtartóképességűnek; az olasz (Basilicata, Tuscany) minták, a valamint a spanyol Santomera minták közül az erdős területről származó F és Fp jónak minősíthetőek.

A WCSSinCS értékeket összetartozó mintánként, pl. egy-egy katéna, mezőgazdasági terület, talajjavítási kísérleti terület talajait egymáshoz viszonyítva, sorrendeket állíthatunk fel. A Puch katénán belüli talajok az A (hagyományos mezőgazdasági terület) > G (rossz gazdálkodási terület) > B (extrém rossz gazdálkodási terület) minta sorrendben képesek vízzel ellátni a növényzetet.

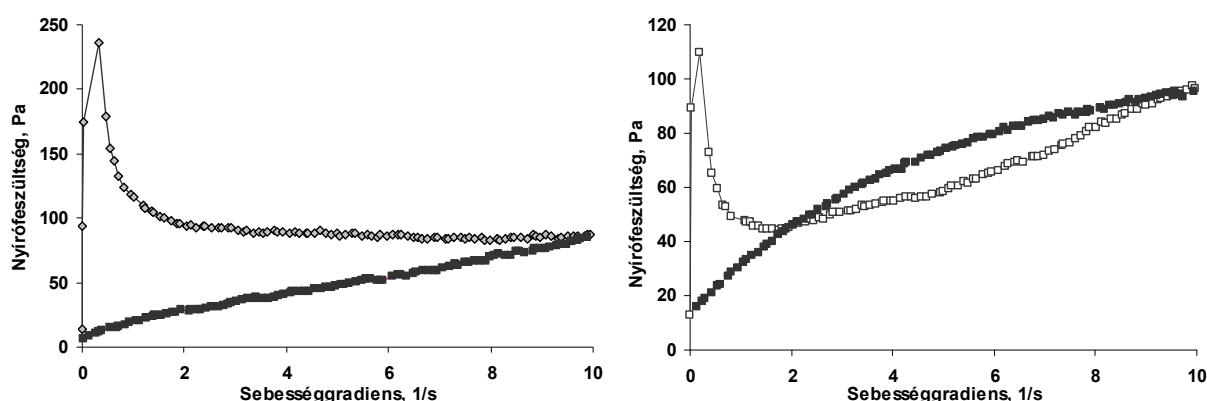
A Santomera katéna, ahol a növényi borítottság hatását vizsgálták, talajai a F (erdős terület) > S (cserjés) > B (kopár, degradált terület) sorrendet mutatják, még az erdőeltávolítás hatása is kimutatható Fp (erdős terület) > Fm (növénymentesített terület). Az olasz minták esetén kimutathatóak a különbségek a CA hagyományos és a biogazdálkodás BA között, a CA > BA.

Az El Aguilcho mintákra is felállítható egy sorrend: TPm < TPMs < P < K < TPmOM < POM < TP < TPOM < TPOMMs, ami alapján elmondható, hogy bizonyos esetekben TPm < TPMs < P < K a talaj minőség romlott a talajjavítási kísérlet hatására. Úgy tűnik a mikorrhiza adagolás szervesanyag hozzáadás nélkül nem javítja a talaj minőségét. Önmagában a visszaerdősítés sem elegendő talajjavítására. A többi esetben a vízmegtartóképességet tekintve sikeresnek bizonyult a talajjavítás K < TPmOM < POM < TP < TPOM < TPOMMs. Tehát, ha kombináljuk az egyes talajjavítási módszereket különböző mértékben javíthatjuk a vízmegtartóképességet. A legjobbnak az összes

alkalmazott módszer vegyítése (TPOMMs: a teraszos művelés, újraerdősítés, szervesanyagadagolás és mikorrhiza bekeverése talajba) bizonyult.

4.4.1. Folyás típusa

Talajszuszpenziókra jellemző folyásgörbe típusokat mutat az alábbi két ábra. (23. a, b. ábra)

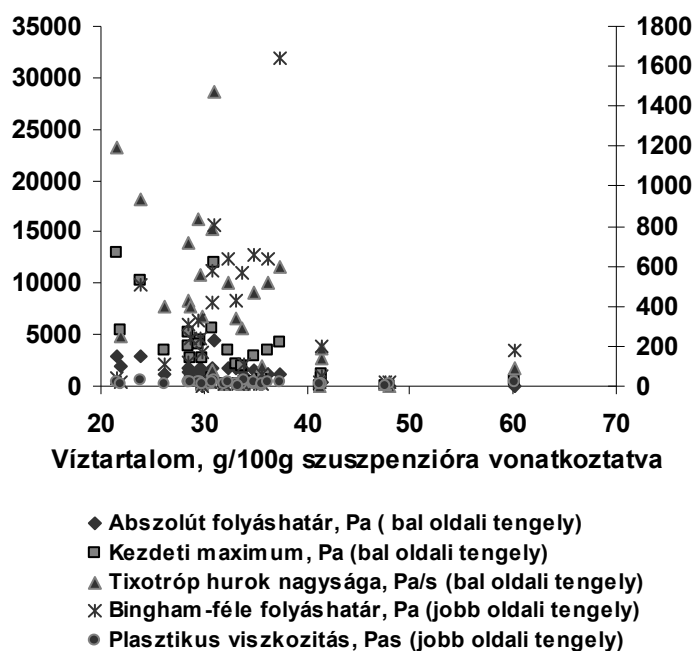


23. a, b. ábra A talajszuszpenziókra jellemző folyásgörbe típusok láthatóak növekvő sebességgradiens (üres jelölő), illetve csökkenő sebességgradiens (teli jelölő) értékeknél

Általában a talajszuszpenziókra, melyek pszeudoplasztikus rendszerek, a 23. ábra baloldalán bemutatott folyásgörbe típus jellemző. A növekvő (üres jelölő), majd csökkenő sebességgradiens (teli jelölő) értékek mellett mért szuszpenziók határozott kezdeti maximummal rendelkeznek, és tixotrópiát mutatnak. A tixotrópia megjelenése az időben lassan kialakuló aggregátumokra jellemző. Ez a folyásgörbe alak nem általános tömény szuszpenziókra, (Barnes 1997.) csak a közepes adhíziójú rendszereknél jelenik meg. A laza talajszuszpenziókra jellemző, ezeknél általános, valamint azoknál a talajmodelleknél, melyekben a megfelelően magas szervesanyagtartalom, kellő mennyiségű kalciumion tartalommal párosul. (Michéli 2002., Bronic és Lal 2005., Majzik 2007. b.) Az olasz talajminták szuszpenziói esetén az antitixotrópia is megjelent, amint az a jobb oldali (23. b.) ábrán látható. Minden tixotróp jellegű szuszpenzió érzékeny a minta előkezelésére, de ez utóbbiak különösen.

4.4.2. A reológiai paraméterek összehasonlítása a víztartalommal

A nyírási-ellenállási görbékből és a folyásgörbékből számolt reológiai paramétereket összehasonlítottam az egyensúlyi üledékek víztartalmával.



24. ábra A 2004-es talajmintákból készült szuszpenziók nyírási-ellenállási valamint folyásgörbéiből számolt reológiai paraméterek összevetése az egyensúlyi üledékek víztartalmával

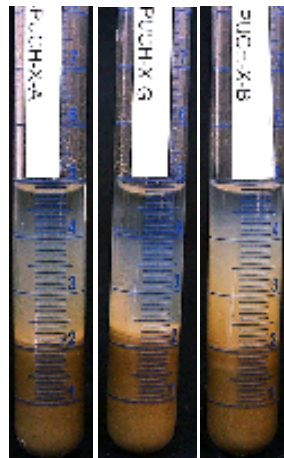
A 24. ábrán mindössze annyi látható, hogy minél nagyobb a víztartalom annál kisebb a szuszpenziók nyírási ellenállása, azaz annál folyékonyabbak; de az összes szuszpenzió reológiai méréseinek eredménye érdemben nem összehasonlítható. Csak a hasonló összetételű, a hasonló gazdálkodásnak, hasonló talajjavítási kísérletnek alávetett területekről származó szuszpenziók reológiai mérései adnak összehasonlítható eredményeket.

4.5. Eredmények értékelése művelési vagy talajjavítási kísérletek mintázási helyei szerint csoportosítva

4.5.1. Mezőgazdasági tevékenység hatásának vizsgálata, Németországból származó Puch talajminták szuszpenzióinak paraméterein keresztül

4.5.1.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján

A német Puch kísérlet parcellákon 50 éve folyik mezőgazdasági termelés. A mintákat az összehasonlítható állapotban felvett víztartalommal minősítve (17. kép) felállítottam egy sorrendet, bár az egyes szuszpenziók víztartalma közt csak 5 százalék körüli volt a különbség. Az A jelű, mely normál művelésű területről származik, bizonyult a legjobb minőségűnek, hiszen ez képes a három minta közül a legtöbb vizet megtartani, illetve a növények számára biztosítani. A G jelű minta, mely rossz gazdálkodást modellező területről származik, kevesebb vizet képes megtartani, a B jelű mintából készült egyensúlyi üledéknek, mely az extrém rossz gazdálkodású területről származik, a legkisebb a WCSSinCS értéke.

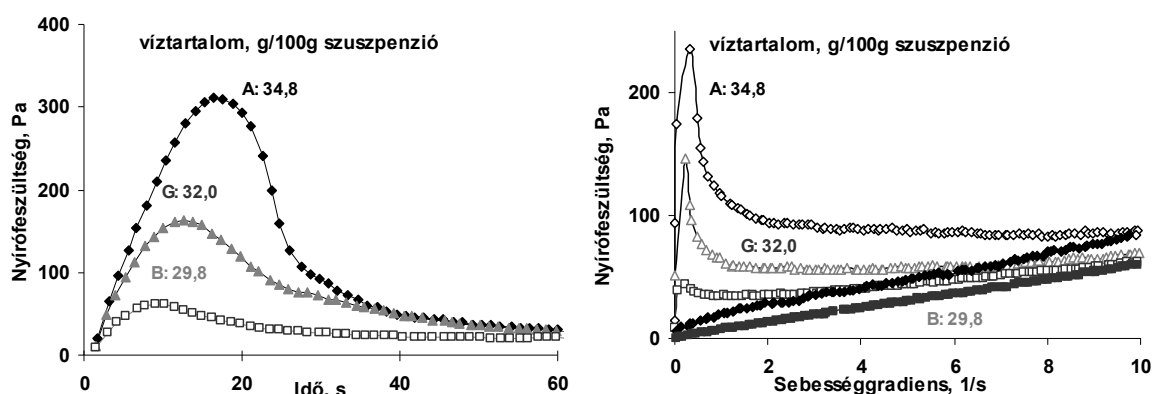


17. kép A Puch mintákból készült egyensúlyi üledékek

Az A és G jelzésű minták közepesen jónak minősíthetők, az összehasonlítható állapotban megtartott víztartalom alapján (egyensúlyban szuszpenzióra vonatkoztatva 30 g/100g víznél valamivel többet képesek megtartani), míg a B jelzésű talajminta már a rossz minőségű kategóriába sorolandó. A rossz vízmegtartóképesség oka, hogy a területet nem trágyázták, és bármilyen növény megjelent a területen azonnal kiszántották, ezért folyamatosan csökkent a talaj szervesanyag-tartalma, eloxidálódott illetve mineralizálódott a szervesanyag.

4.5.1.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata

A rossz gazdálkodásmódnak köszönhető szervesanyagtartalom csökkenés a talajszerkezet romlásához vezet, (Papiernic 2006.) a szerkezet gyengülése a talajszuszpenziók reológiai tulajdonságaiban is megnyilvánul. Meghatároztam és értékeltem az összehasonlítható állapotban levő talajszuszpenziók nyírási-ellenállási görbéit és folyásgörbéit. (25. a, b. ábra)



25. a, b. ábra A Puch terület 2004-es mintáiból (A - normál, G - zöld és B – fekete parcella) készült összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak nyírási-ellenállási (bal oldali ábra) és folyásgörbéinek (jobb oldali ábra) összevetése (növekvő (felszálló ág, üres jelölő) majd csökkenő (leszálló ág, teli jelölő) sebességgradiens értékeknél (A szuszpenziók a talajminták 1 mm alatti frakciójából készültek, mérés előtt 24 órát álltak 25°C-on. A görbék felett, a szuszpenziók betűjele és víztartalma látható 100 g szuszpenzióra vonatkoztatva.)

Az egyensúlyi üledékek folyásgörbék illetve nyírási-ellenállási görbék alakja tipikusan jellemző a talajszuszpenziókra illetve az azt modellező agyagásvány szuszpenziókra, tehát határozott a maximum, és nagy a tixotróp hurok. Az ezekből számolt paramétereket és a hozzájuk tartozó szervesanyagtartalom értékeket tartalmazza a 3. táblázat. A szervesanyagtartalommal (OM) jellemezhető a talajminőség. A szervesanyagtartalmat jellemző értékek, a humuszanyagból származó széntartalom a (Chum, ppm), melyet 1:20 (szilárd: folyadék arányú) nátriumpirofoszfát extraktum (pH 9.8) szűrése ill. centrifugálása után Shimadzu TOC5050A TOC készülékkel és a teljes szerves széntartalom (TOC, g/100g), melyet savas közegben végzett K_2CrO_7 oxidációval, a felesleges dikromátot $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ -al visszatitrálva határoztak meg. (Bastida és társai 2008.) Ezek az értékek az INDEX projekt honlapján megtalálható adatbázisból származnak (www.soil-index.com).

3. táblázat 2004. évi Puch mintákból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbéből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az $\Delta\tau_{thixo}$, Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plasztikus viszkozitás. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, a TOC, g/100g a teljes szerves széntartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	$\Delta\tau_{thixo}$	τ_B ,	η_{pl} ,	Chum,	TOC,
2004. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	ppm	g/100g
Puch-A	$34,8 \pm 0,1$	311 ± 1	291 ± 65	563 ± 86	7 ± 5	$6,0 \pm 1,0$	3243 ± 8	$1,2 \pm 0,1$
Puch-G	$32,0 \pm 0,3$	171 ± 9	150 ± 4	231 ± 13	6 ± 3	$5,0 \pm 0,9$	2775 ± 20	$0,7 \pm 0,0$
Puch-B	$29,8 \pm 0,2$	74 ± 13	39 ± 2	146 ± 1	$1,5 \pm 0,3$	$5,8 \pm 0,0$	2531 ± 21	$0,8 \pm 0,1$

A reológiai paraméterek (mind a szerkezetet jellemző: abszolút folyáshatár, a kezdeti maximum, és a tixotróp hurok nagysága, mind a lenyírt szerkezetre jellemző a Bingham-féle folyáshatár) párhuzamosan változnak, a plasztikus viszkozítások közt nem mutatható ki jelentős különbség. Úgy tűnik egy paraméter elegendő a szerkezet erősségének jellemzésére, illetve elegendő ezt összehasonlítani egyéb kémiai paraméterekkel.

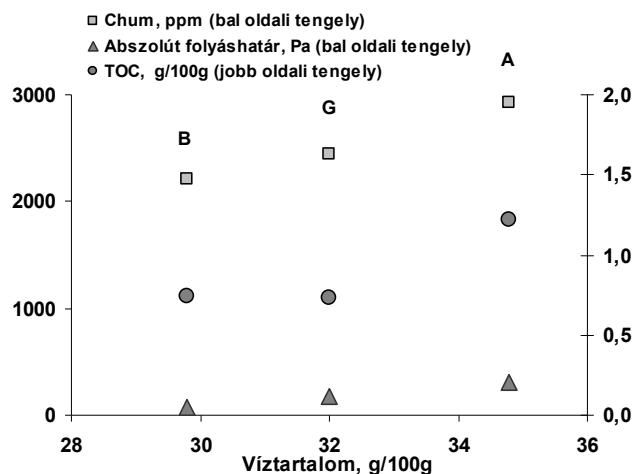
Ha összevetjük a 2004. évi talajminták egyensúlyi üledékeinek eredményeit hasonló tendencia figyelhető meg, mint az azonos víztartalmú szuszpenzióknál, de az egyes értékek közti különbségek jobban közelítik a valós talajszerkezetre jellemző különbségeket. Látható, hogy a normál mezőgazdasági (A) terület mintájából készült szuszpenzió, noha ez a leghígabb, mért értékei így is a legmagasabbak és az extrém rossz gazdálkodás (B) rombolja leginkább a szervesanyagtartalmat, így ez esetben romlik leginkább szerkezet erőssége. A tixotróp hurok nagysága nagyságrendileg akkora, mint a kezdeti maximum értéke, tehát már viszonylag kis deformáció hatására lerombolódik a talajszuszpenziókban kialakult szerkezet.

4. táblázat 2005. évi Puch mintákból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbéből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az Δ_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plasztikus viszkozitás. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, a TOC, g/100g pedig a teljes szerves széntartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek 2005. évi minták	H_2O , g/100g	τ_0 , Pa	τ_{inimax} , Pa	Δ_{thixo} , Pa/s	τ_B , Pa	η_{pl} , Pas	Chum, ppm	TOC, g/100g
Puch-A	$31,5 \pm 0,3$	1669 ± 213	3665 ± 506	10996 ± 1515	634 ± 83	30 ± 4	2635 ± 72	$1,2 \pm 0,1$
Puch-G	$28,1 \pm 0,6$	1059 ± 79	1463 ± 36	4843 ± 824	181 ± 68	29 ± 9	2431 ± 181	$1,2 \pm 0,1$
Puch-B	$25,9 \pm 0,4$	1124 ± 58	1586 ± 71	3091 ± 201	83 ± 13	28 ± 3	2247 ± 45	$0,9 \pm 0,1$

A 2005. évi talajszuszpenziók (4. táblázat) esetén a felvett víztartalmak 3-4 százalékkal csökkentek a 2004-ben vett mintákhoz képest, és ezáltal a reológiai paraméterek értékei többszörösükre növekedtek, amelyet a koncentrációfüggés vizsgálatok eredményei indokolnak. (4.1.4. fejezet)

Az abszolút folyáshatár, és a kezdeti maximum értékek sorrendje a többi paraméterrel ellentétben felcserélődött a B és G-jelű szuszpenziók esetén, aminek valószínűsíthető oka az, hogy a B-jelű szuszpenziók víztartalma alacsony, ez esetben a mérhető koncentráció-tartomány minimum értékéhez (vízszám) közelít. Az A jelzésű, normál gazdálkodási területről származó mintából készült összehasonlítható állapotú szuszpenzió 3,26 százalékos víztartalom csökkenése 5-szörös növekedést okoz az abszolút folyáshatár értékében, illetve a tizenkétszeres (a B és G jelű mintáknál még nagyobb mértékű) növekedést a kezdeti maximum értékében, ami szintén azt bizonyítja, hogy még a legmagasabb víztartalmú szuszpenzió is igen tömény, azaz víztartalma közel van a mérhető víztartalom-tartomány minimumához, ahol a közel exponenciális függvény meredeken emelkedik.



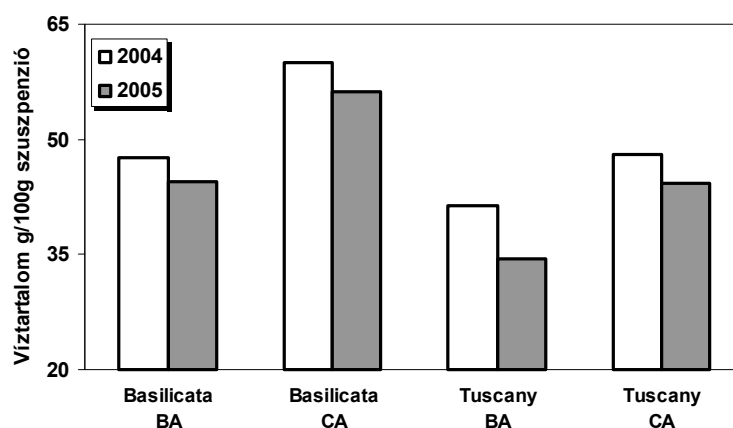
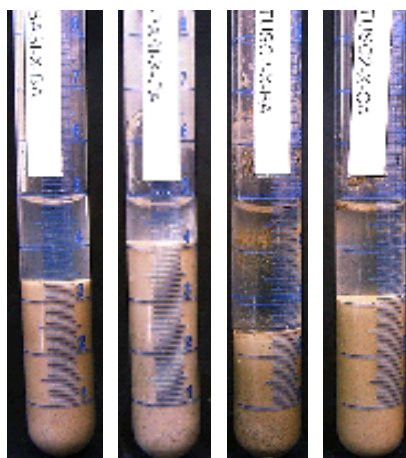
26. ábra A 2004. évi Puch talajminták teljes szerves széntartalmának (TOC, g/100g), humuszanyagból származó széntartalmának (Chum, ppm) és az egyensúlyi üledékek abszolút folyáshatárának összevetése a víztartalom (WCSSinCS, g/100g) függvényében

A 2004-ben mintázott talajok szuszpenziói esetén a meghatározott reológiai paraméterek ugyanazt a sorrendet mutatják, mint a spanyol csoport által meghatározott szervesanyagtartalom és a humuszanyagból származó széntartalom értékek. (26. ábra) (Akagi 2008.) A szervesanyagtartalom növekedésével egyenes arányban növekszik az abszolút folyáshatár értéke, tehát gazdálkodás hatására változó szervesanyag mennyiség, a talaj részecskéi közt kialakult fizikai térháló erősségének megváltozása ezzel a paraméterrel jól jellemezhető.

4.5.2. Biológiai és hagyományos mezőgazdálkodás hatásának vizsgálata Olaszországban

Több mint négy éves, hosszú távú mezőgazdasági kísérletet folytattak Basilicata és Tuscany területén. A biogazdálkodás zöldtrágyázást jelent és a hagyományos gazdálkodás műtrágyázással jár, a növényzet a két területen azonos. A kétféle minta közti különbség megmutatkozik a felvehető illetve teljes iontartalmakban, mely jelentősen befolyásolja a talaj vízmegtartó képességét.

4.5.2.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján



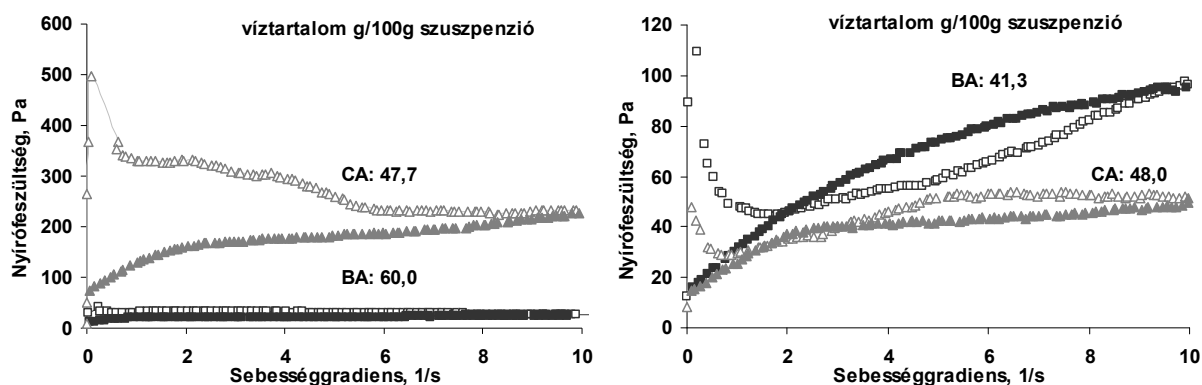
18. kép, 27. ábra. A 2004. (fehér oszlopok) és 2005. (szürke oszlopok) években mintázott basilicatai talajokból készült egyensúlyi üledékek víztartalmainak összevetése

Összehasonlítható állapotban az olasz talajok szuszpenzióinak víztartalmai igen különbözőek, és kiemelkedően magasak, kiváltképpen a normál mezőgazdasági mintáké (CA). Így ha csak az egyensúlyi üledékek víztartalmát vizsgáljuk, a vízmegtartóképesség szempontjából a talajok mindegyike jónak minősül. (18. kép, 27. ábra) A magas vízmegtartóképességet az magyarázza, hogy nagyon magas a talajok sótartalma, ez higroszkópossá teszi őket. Az összes INDEX minta közül ezek képesek a legtöbb vizet megtartani, a mért WCSSinCS értékek egy (2005. BA, Tuscany) kivételével 40 g/100g felettiek. Összehasonlítva a bio (BA) és hagyományos (CA) gazdálkodási területről származó talajmintákat, mindig a hagyományos gazdálkodású területekről származó minták vízmegtartó képessége bizonyult magasabbnak, a magasabb szervesetlen iontartalom miatt, melyet a műtrágyázás okoz (ammónium nitrátot valamint ammónium nitrát és ammónium foszfát

keveréket adagoltak a Tuscany és Basilicata területén). Lipiec és munkatársai összevetették a különböző gazdálkodási módok hatásait, arra a következtetésre jutottak, hogy a normál művelésű területnek a legnagyobb a porozitása. (Lipiec és társai 2006.) Nyilvánvalóan a növények számára, a nagyobb vízmegtartóképességű CA minták lennének képesek több vizet biztosítani, de szerkezetképzést vizsgálva már nem ilyen egyértelmű a helyzet.

4.5.2.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata

Az extrém magas víztartalom elfolyósítja a szuszpenziókat, gyengíti a szerkezetet. A Na^+ erőteljesen diszpergáló hatású, ez felelős az aggregátumok szerkezetének letöréséért. (Bronic és Lal 2005.) A folyás típusa is megváltozhat. Ha minősíteni akarjuk a területet, meg kell találnunk egy optimumot, a reológiai paraméterek és a víztartalom között, hogy feloldjuk az ellentmondást. A túl magas víztartalom hatására elfolyósodhat a talaj, és így a szerkezet kevésbé lesz a nyírásnak ellenálló, már kisebb mértékű deformáció is lerombolja a fizikai térhálót, így ezek a szuszpenziók a deformáció megszűnése után, még a többi talaj szuszpenziójának fizikai térhálójához képest is lassan regenerálódnak. A túlzott műtrágyázás hatása is ebbe az irányba mutat.



28. a, b. ábra. 2004. évi basilicatai (bal oldali ábra) és a tuscany-i (jobb oldali ábra) talajmintákból készült összehasonlítható állapotú szuszpenziók folyásgörbéinek összevetése növekvő (felszálló ág, üres jelölő), majd csökkenő (leszálló ág, teli jelölő) sebességgradiens értékeknél. (A szuszpenziók a talajminták 1 mm alatti frakciójából készültek, mérés előtt 24 órát álltak 25°C-on. A görbék felett a szuszpenziók betűjele és víztartalma látható 100 g szuszpenzióra vonatkoztatva.)

A 2004-es tuscan-y-i szuszpenziók esetén ugyanúgy megjelenik az antitixotrópia, mint a 36 g/100g vizet tartalmazó azonos koncentrációjú szuszpenziók esetén, úgy tűnik mintha a nyírás hatására elfolyósodott szerkezet erősebbé épülne. A valódi ok a térfogat egységben levő részecskék nyírás hatására megnövekedett számában keresendő. (28. a, b. ábra) A basilicatai szuszpenziók folyásgörbéi a talajszuszpenziókra jellemző alakot adják.

Megjegyzendő azonban, hogy mivel ezekben a szuszpenziókban duzzadó agyagásvány részecskék (Oades 1990.) vannak, azok nyírás hatására vizet veszítenek, a mérés során a mérőfej tömöríti a szemcséket, a nagy mennyiségű vízből valamennyit kiszorít, így a csökkenő sebességgradiens értékeknél néhány százalékkal töményebb szuszpenziót mérünk, mint a mérés kezdeti szakaszában.

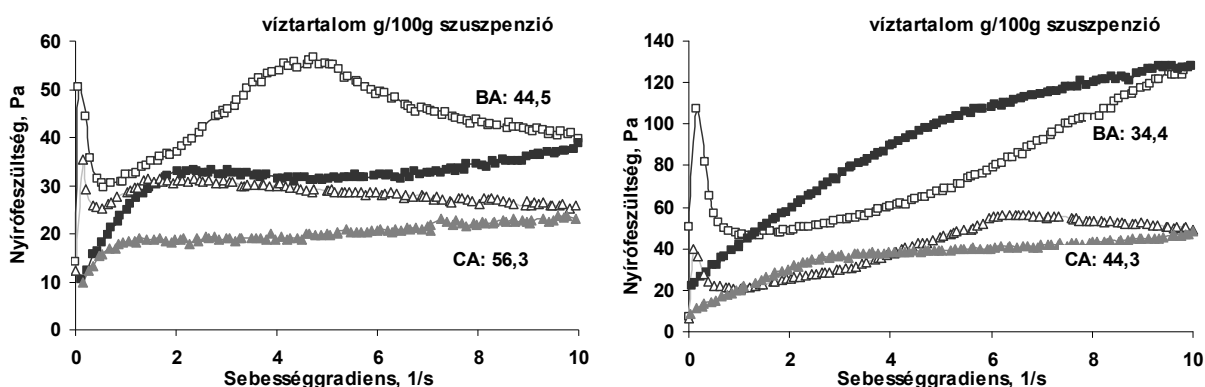
5. táblázat 2004. évi olasz mintákból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbéből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az Δ_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, a TOC, g/100g pedig a teljes szerves széntartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	Δ_{thixo} ,	Chum,	TOC,
2004. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	ppm	g/100g
Basilicat- BA	$47,7 \pm 1,2$	$19,1 \pm 0,7$	44 ± 5	98 ± 17	1755 ± 44	$1,1 \pm 0,03$
Basilicata- CA	$60,1 \pm 0,3$	75 ± 3	583 ± 121	1789 ± 1088	1561 ± 51	$1,2 \pm 0,05$
Tuscany- BA	$41,3 \pm 0,9$	126 ± 29	94 ± 14	19 ± 55	1521 ± 23	$2,3 \pm 0,03$
Tuscany- CA	$48,0 \pm 0,2$	401 ± 4	46 ± 6	42 ± 13	1956 ± 51	$3,0 \pm 0,15$

Az előbbi hibát kiküszöbölendő a nyírási-ellenállási görbéket is összehasonlítottam. A nyírási-ellenállási görbék maximuma párhuzamosan változik a folyásgörbék maximumaival, tehát egyértelműen a normál mezőgazdasági területről származó CA jelzésű minta értékei magasabbak, ennek szerkezete erősebb.

A 2004. évi összehasonlítható állapotú szuszpenziók reológiai eredményeit (5. táblázat) vizsgálva a basilicatai minták esetén, az azonos koncentrációjú szuszpenziók eredményeihez hasonló sorrendet figyelhetünk meg. A magasabb abszolút folyáshatár és kezdeti maximum értékek, valamint a nagyobb tixotróp hurok a normál mezőgazdálkodás (CA) mintájából készült magasabb víztartalmú szuszpenzióhoz tartoznak. Ez alapján a talajok szerkezetileg, és vízmegtartóképesség szempontjából is jónak minősülnek. A tuscan-y-i minták esetén ez a sorrend csak tixotróp hurok értékeire igaz. Valószínűleg a nagy só és víztartalom

miatt nem arányosak egymással a reológiai paraméterek, egyedül a tixotróp hurok nagysága növekszik a szervesanyag mennyiségének növekedésével. A szervesanyag mértékének növekedésével nem volt megfelelő arányban a kalciumion tartalom mennyisége, így a szerkezet nem javult. Bár maguk a meghatározott szervesanyagtartalom változások sem egyértelműek.



29. a, b. ábra 2005-ös basilicatai (bal oldali görbék) és tuscani (jobb oldali görbék) talajmintákból készült összehasonlítható állapotú szuszpenziók folyásgörbéinek összevetése növekvő (felszálló ág, üres jelölő), majd csökkenő (leszálló ág, teli jelölő) sebességgradiens értékeknél (A szuszpenziók a talajminták 1 mm alatti frakciójából készültek és mérés előtt 24 órát álltak 25 °C-on. A görbék felett a minták betűjele és a szuszpenziók víztartalma látható 100g szuszpenzióra vonatkoztatva.)

2005-ben (6. táblázat) már egyik mintázási terület szuszpenziója esetén sem kapjuk a talajszuszpenziókra jellemző görbe alakot (29. a, b. ábra). a tuscani mintákból készült szuszpenziók ez esetben is érzékenyebbek az érintésre, mint a basilicataiak. Az ilyen talajok esetén még inkább kifejeződik a mezőgazdasági nagy gépek, normál mezőgazdasági művelés talajkompaktáló hatása. (Hamza 2005.)

A 6. táblázatban összehasonlítottam a 2005. évi adatokat, a BA jelű biogazdálkodási területek és a CA jelű normál mezőgazdasági területek szuszpenzióinak reológiai paramétereit. Az összehasonlítható állapotban magasabb víztalommal rendelkező basilicatai szuszpenziók reológiai paraméterei kb. a Tuscani szuszpenziók értékeinek 1/3-a. Mindkét mintázási hely esetén a biogazdálkodású terület szuszpenziója az erősebb szerkezetű, tekintve az abszolút folyáshatár és a kezdeti maximum értékeket, amelyek a víztartalommal fordítottan arányosak, ami logikus, hiszen mint már korábban is említettem, a szuszpenziók reológiai jellemzői alapján várható, hogy a víztartalom növekedése, a térfogategységenként jelenlevő

kötéspontok számát csökkenti, így a mérhető reológiai paraméterek értékei is kisebbek lesznek. A Tuscan szuszpenziók esetén jellegzetes negatív tixotropia lép fel.

6. táblázat 2004-es évi olasz mintákból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbéből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az Δ_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, a TOC, g/100g pedig a teljes szerves széntartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	Δ_{thixo} ,	Chum,	TOC,
2005. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	ppm	g/100g
Basilicata-BA	$44,5 \pm 0,4$	99 ± 5	$50,0 \pm 0,6$	122 ± 9	2015 ± 9	$1,3 \pm 0,03$
Basilicata-CA	$56,3 \pm 0,6$	$73,7 \pm 0,6$	39 ± 6	99 ± 15	2346 ± 131	$1,6 \pm 0,1$
Tuscany-BA	$34,4 \pm 0,1$	171 ± 16	114 ± 21	-122 ± 12	1461 ± 79	$1,3 \pm 0,2$
Tuscany-CA	$44,3 \pm 0,1$	112 ± 12	86 ± 7	-71 ± 96	2040 ± 227	$1,8 \pm 0,1$

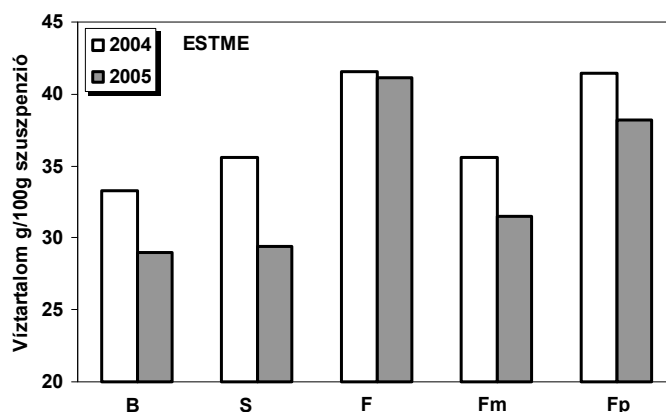
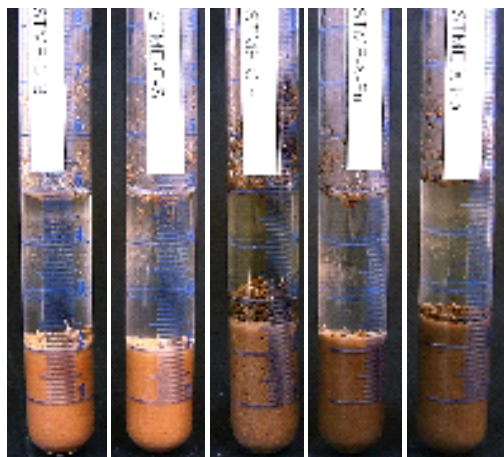
Az abszolút folyáshatár értékét összehasonlítva a szerkezet erősségét szintén jellemző szervesanyagtartalommal, a teljes szerves széntartalommal (TOC), illetve a humuszanyagból származó széntartalommal (Chum) párhuzamos változás figyelhető meg. A szervesanyagtartalom növekedése a talajmintában, az abszolút folyáshatár csökkenését vonja maga után. Hiába nagy a szervesanyagtartalom, és az ezzel párhuzamosan növekvő felvehető vízmennyiség, ha ez utóbbi elfolyósítja a szuszpenziót, tehát szerkezetromboló hatású, a megfelelő kalciumtartalom jelenléte nélkül.

4.5.3. Növényi borítottság hatásának vizsgálata a spanyolországi Santomera katénában

A növényi borítottság hatását már korábban is vizsgálták. (Tisdall és Oades 1979., 1997., Ghazala Nasim 2005.) Jelen munkában ezt a Santomera katéna 2004. és 2005. évi mintáiból készített összehasonlítható állapotú szuszpenziók nyírási-ellenállási görbéinek és folyásgörbéinek elemzésén keresztül vizsgálhatjuk. A folyásgörbék alakja a talajszuszpenziókra jellemző, a meghatározott reológiai paramétereket a 31. a, b. ábrákon hasonlítottam össze, illetve megadtam a 7., 8. táblázatban.

Az összehasonlítható állapotú szuszpenziók víztartalmai alapján jellemeztem a talajminták vízmegtartóképeségét.

4.5.3.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján

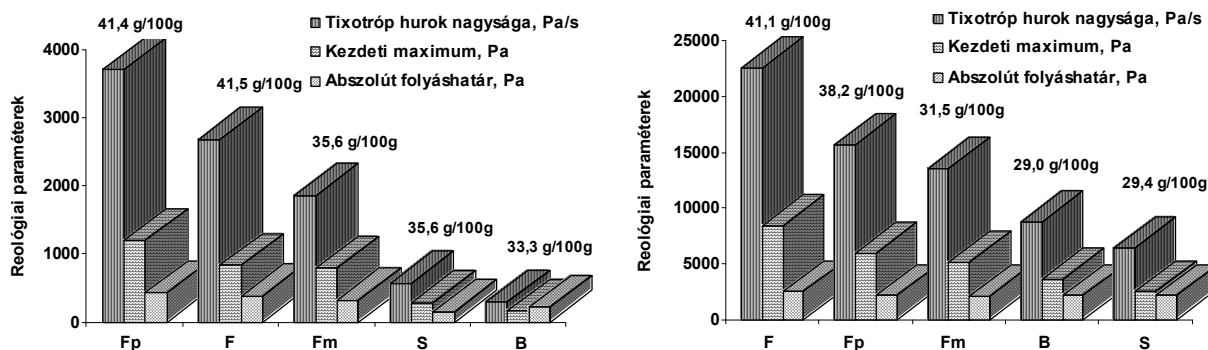


19. kép és 30. ábra Változó növényi borítottságú területről (Santomera katéna) származó 2004. (fehér oszlopok) és 2005. (szürke oszlopok) évek talajmintáiból készült egyensúlyi üledékek víztartalmainak összevetése

A Santomera katéna egyensúlyi üledékei és víztartalmuk látható a 19. képen és a 30. ábrán. A legmagasabb WCSSinCS értékeket az erdős területek (F és Fp) mintái esetén tapasztaltam mindkét mintázási évben, míg a kopár (B) és cserjés (S) illetve a erdőirtott terület (Fm) talajmintákból készült egyensúlyi üledékek esetén nem találtam szignifikáns eltérést a 2004 és 2005-ös minták közt, ezek WCSSinCS értéke ~30 g/100g. A 40 százalék feletti, jó minőségű két (F és Fp) erdős területről származó minta kivételével, minden esetben 30 százalék körüli vagy fölötti a megtartott víztartalom, így e minták közepes minőségű talajoknak tekinthetőek vízmegtartóképesség, így növényzet vízzel való ellátása szempontjából.

4.5.3.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata

A összehasonlítható állapotban levő talajszuszpenziók nyírási-ellenállási és folyásgörbéinek kiértékelésével meghatározott reológiai paramétereket a 31. a, b. ábrán és 7. táblázatban mutatom be.



31. a, b. ábra Santomera katéna 2004 (bal oldali ábra) és 2005 (jobb oldali ábra) évi mintáiból készült talajszuszpenziók reológiai paramétereinek összehasonlítása (A folyásgörbékből a kezdeti maximum (Pa) és a tixotróp hurok nagysága (Pa/s), a nyírási-ellenállási görbéből pedig az abszolút folyáshatár (Pa); az oszlopok felett a szuszpenziók víztartalma (H₂O g/100 g).)

Amint az a 31. a, b. ábrán is látható, a kezdeti maximum, a tixotróp hurok nagysága, és az abszolút folyáshatár egymással párhuzamosan változnak. Annak ellenére, hogy a szuszpenziók reológiai tulajdonságai (Barnes és társai, 1989.) alapján mást várnánk, a mért adatok az összehasonlítható állapotú szuszpenziók víztartalmának növekedésével növekednek. Magas víztartalmuk ellenére a szuszpenziók nyírási ellenállása nagy. Minél nagyobb a növényi borítottság, annál erősebb a szuszpenzióban a részecskék közt spontán kialakuló fizikai térháló, mely a magas vízmegtartóképeséggel együttesen igen jó talajminőséget jelent.

Az összehasonlítható állapotban lévő szuszpenziók reológiai jellemzése egyértelműen jellemző különbségeket mutat az egyes minták között. (7. táblázat) A 2004-es szuszpenziók kezdeti maximum értékeit vizsgálva felállítható egy sorrend, a talajszuszpenziók szerkezeti erősségére.

7. táblázat A Santomera katéna 2004-ben vett mintáiból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbékből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az Δ_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plasztikus viszkozitás. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, az OM, g/100g a TOC értékéből (1,72-szeres TOC) számolt szervesanyagtartalom (Bastida és társai 2008. a.) (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek 2004. évi minták	H_2O , g/100g	τ_0 , Pa	τ_{inimax} , Pa	Δ_{thixo} , Pa/s	τ_B , Pa	η_{pl} , Pas	Chum, ppm	OM, g/100g
Santomera-Fp	41,4 ± 0,1	433 ± 9	1198 ± 50	3706 ± 240	201 ± 16	11,3 ± 0,9	8041 ± 118	6,9 ± 0,0
Santomera-F	41,5 ± 0,6	385 ± 31	832 ± 59	2678 ± 907	45 ± 6	6,1 ± 0,3	5323 ± 34	6,7 ± 0,2
Santomera-Fm	35,6 ± 0,2	323 ± 16	793 ± 79	1857 ± 289	64 ± 1	9,4 ± 0,6	5743 ± 487	5,2 ± 0,4
Santomera-S	35,6 ± 0,1	152 ± 5	288 ± 72	575 ± 117	13 ± 4	3,7 ± 1,0	1839 ± 96	2,0 ± 0,2
Santomera-B	33,3 ± 0,5	218 ± 35	161 ± 48	297 ± 79	10 ± 1	3,4 ± 0,4	1189 ± 16	1,5 ± 0,3

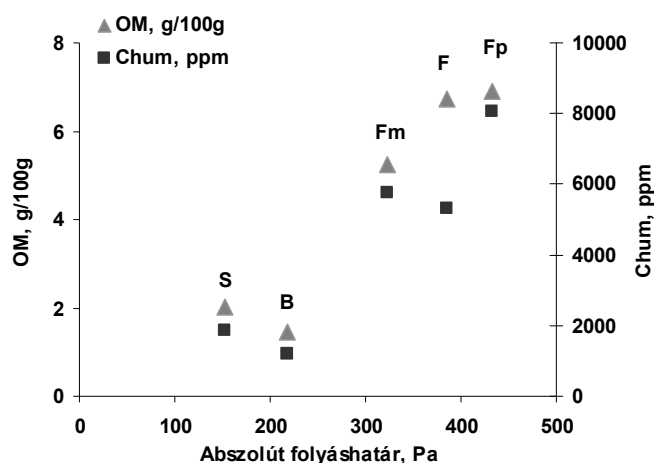
A szerkezet erősségét jellemző kezdeti maximum értékek a szervesanyagtartalom növekedésével (OM és Chum) egyenes arányban növekednek. A legerősebb szerkezetre jellemző, legmagasabb kezdeti maximum értékeket az erdő borítású talajokból (Fp, F) készült szuszpenziók mutatják, míg a legalacsonyabbat a cserjés terület (S), valamint a pusztás (B) terület szuszpenziója mutatja. A lepusztított erdős terület (Fm) talajmintájának értékei ezek közé esnek.

8. táblázat A Santomera katéna 2005-ös mintáiból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbékből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az Δ_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plasztikus viszkozitás. A Chum (ppm) a humuszanyagok széntartalma, az OM, g/100g a TOC értékéből (1,72-szeres TOC) számolt szervesanyagtartalom. (Bastida és társai 2008. a.) (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek 2005. évi minták	H_2O , g/100g	τ_0 , Pa	τ_{inimax} , Pa	Δ_{thixo} , Pa/s	τ_B , Pa	η_{pl} , Pas	Chum, ppm	OM, g/100g
Santomera-Fp	41,1 ± 0,4	2509 ± 206	8380 ± 953	22547 ± 5246	935 ± 236	38 ± 11	7789 ± 124	7,6 ± 0,3
Santomera-F	38,2 ± 1,2	2167 ± 137	5965 ± 417	15659 ± 747	1003 ± 339	35 ± 10	5632 ± 3	6,6 ± 0,5
Santomera-Fm	31,5 ± 0,4	2056 ± 90	5097 ± 698	13523 ± 711	757 ± 117	28 ± 9	5473 ± 424	5,2 ± 0,1
Santomera-S	29,4 ± 0,3	2161 ± 50	2511 ± 241	6415 ± 780	312 ± 135	10 ± 2	1241 ± 797	2,3 ± 0,3
Santomera-B	29,0 ± 0,4	2150 ± 18	3653 ± 130	8805 ± 250	446 ± 59	12 ± 1	1785 ± 190	2,3 ± 0,1

A 2005. évi szuszpenziók (8. táblázat) esetén ugyanazokat a megállapításokat tehetjük, mint az előző évben. A sorrend hasonló, a csökkenő növényi borítottsággal csökkennek a reológiai paraméterek, de a víztartalom kismértékű csökkenése, jelentős növekedést okozott a reológiai paraméterekben, ami az abszolút folyáshatár és a tixotróp hurok nagysága esetén nagyságrendi ugrást jelent. A koncentrációfüggés vizsgálatok 30 százalékos víztartalmú szuszpenziói esetén és az ez alatti víztartalmúaknál ugyanezt tapasztaltam. Még a két különböző erdős terület (természetes erdős terület (F) és mesterséges erdős terület (Fp)) szuszpenziói közt is kimutathatóak a különbségek a reológiai paraméterek segítségével, ahogyan az várható volt egy korábbi tanulmány alapján. (Masciandaro és társai 2008.)

A talaj minősége a szervesanyagtartalom (OM) és a humuszanyagokból származó széntartalommal (Chum) jellemezhető. (Bastida és társai 2008. a.) Mivel a növényi takaró minősége, mennyisége a talajminőséggel szorosan összefügg, ennek hatásait is jelzi a szervesanyagtartalom változása. Fontos megállapítás, hogy a szuszpenziók szerkezetének erőssége, nyírási ellenállása szintén párhuzamosan növekszik a minták szervesanyagtartalmának növekedésével. Így az abszolút folyáshatár értéke is növekszik a minták szervesanyagtartalmának növekedésével. (Ami a 8. táblázatban és a 32. ábrán is látható.)



32. ábra A 2004. évi santomerai talajminták teljes szervesanyagtartalmának (OM), a humuszanyagból származó széntartalmának (Chum) és az összehasonlítható állapotú szuszpenziók abszolút folyáshatárának összevetése

A növénytakaró sűrűségének növekedése, a lehullott, majd elbomlott növényi szervesanyag által, szintén javítja a talaj minőségét. Ez a hatás az aggregált részecsketérháló szerkezetének erősödésében is megnyilvánul, amennyiben megfelelő mennyiségű kalciumion (mely az

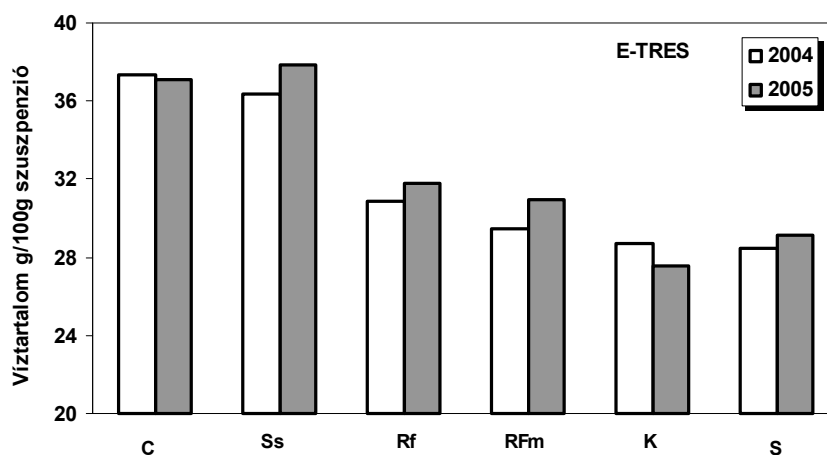
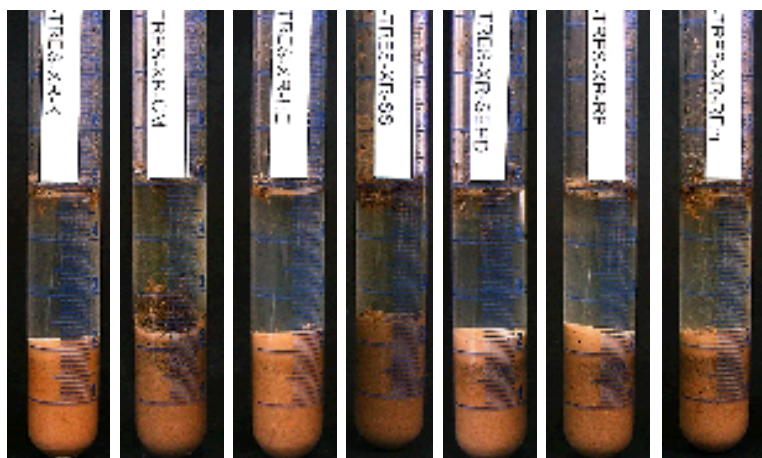
agyagásvány részecskék és a szervesanyagtartalom közti Ca-hidak által, szerkezetképző hatású Michéli 2002., Bronic és Lal 2005.) van jelen. Mivel a spanyol terület alapkőzete mészkő, a szerkezetképzéshez szükséges kalcium mindig elérhető, így természetesen, a szervesanyag megnövekedése a talajban, annak szerkezeti javulásában is megnyilvánul. (Bronic és Lal 2005., Majzik és társai 2007. b.)

A növények gyökerei a talajszerkezetet összefogva (Ingelmo és társai 1998., Moreno-de las Heras 2009.) erősítik, ellenállóvá teszik azt. A talaj szervesanyagtartalmának növekedésével a nyírási-ellenállási görbék maximuma, az abszolút folyáshatár értéke egyenes arányú növekedést mutat. (32. ábra) A pusztás területről származó talajminta szuszpenziójának az abszolút folyáshatára azért haladja meg a cserjés terület értékét, mert az előbbi szuszpenziójának víztartalma közelíti a minimális értéket. Ezt figyelembe véve, az adatok növekedésének iránya egyértelműen kopár < cserjés < erdős terület irányba mutató talajszerkezeti javulást jelez.

4.5.4. Bioremediáció a Santomera katéna „miniparcelláin” (Tres Caminos)

2004-től Spanyolország ugyanezen területén létesített kísérleti parcellákon bioremediációs kísérleteket is folytattak, a különböző beavatkozások hatását vizsgálták (komposzt, illetve humoenzimek adagolásának hatását, a kontroll területtel összehasonlítva, valamint az újraerdősítés, és az újraerdősítés + mikorrhiza adagolás hatását, magkeverék és hígtrágya alkalmazását). Megjegyzendő, hogy a reológiai vizsgálatok a talajminták nagy kő és szálanyag tartalma miatt csak a minták kis, 55-65 százalékára jellemzőek.

4.5.4.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján

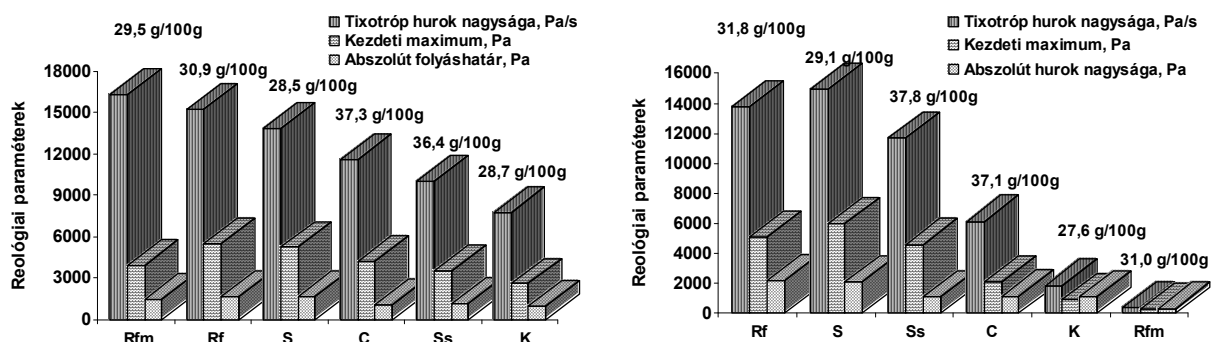


20. kép és 33. ábra Santomera katéna „miniparcelláiból” (Tres Caminos) származó 2004. (fehér oszlopok) és 2005. (szürke oszlopok) évek talajmintáiból készült egyensúlyi üledékek víztartalmainak összevetése

Amint az a 20. képen és a 33. ábrán látható, az összehasonlítható állapotban a szuszpenziókra jellemző víztartalmak alapján az Rfm (újraerdősített, mikorrhizával kezelt talaj), S (magvakkal kezelt), és a K (kontroll) rossznak minősíthető, mivel a WCSSinCS alacsonyabb 30 g/100g-nál, a többi minta normál vízmegtartóképességű (WCSSinCS értékük 30-40g/100g között van). Bármely mintát nézzük, a magvakkal kezelt 2004-es minta kivételével, a kontrollhoz képest több vizet képes megtartani. Tehát a talajjavítás egy eset kivételével sikeres volt. Ami a komposzt-adagolás illetve a szennyvíziszappal kezelt minták esetén korábbi tanulmányok alapján várható is volt. (Ingelmo és társai 1998., Albiach és társai 2000., 2001. a., b., Szegi és társai 2008., Bastida és társai 2008. b.)

4.5.4.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata

Meghatároztam az összehasonlítható állapotú szuszpenziók folyásgörbéit és nyírási-ellenállási görbéit, melyek a talajszuszpenziókra jellemző alakúak, kifejezett maximummal rendelkeznek, és tixotrópiát mutatnak. Majd ezekből számoltam a reológiai paramétereket.



34. a, b. ábra Bioremediációs kísérleti miniparcellák (Tres Caminos) 2004 (bal oldali ábra) és 2005 (jobb oldali ábra) évi talajmintáiból készült szuszpenziók reológiai paramétereinek, a folyásgörbékből a kezdeti maximum (Pa) és a tixotróp hurok nagysága (Pa/s), a nyírási-ellenállási görbéből pedig az abszolút folyáshatár (Pa) összehasonlítása; az oszlopok felett a szuszpenziók víztartalma (H_2O g/100 g) látható

A miniparcellákon különböző talajjavítási kísérletek hatását kívánták összehasonlítani. Mivel a többi reológiai paraméterben bekövetkezett változás nem egyértelmű, a tixotróp hurok nagyságával jellemezhető a szuszpenziók szerkezete. A víztartalmat is figyelembe véve nem egyértelmű a helyzet, mivel a víztartalom és a reológiai paraméterek változása nem párhuzamos. (34. a, b. ábra)

A reológiai paramétereket igen sok tényező befolyásolja, ezért a különféle talajjavítási kísérlet eredménye nem összehasonlítható, csak a kontroll mintához viszonyíthatjuk őket, vagy két mintát egymáshoz. Például a legmagasabb víztartalmú komposztal kezelt (C) szuszpenzió nem sokkal alacsonyabb tixotróp hurok értékkel bír, mint a tőle 8-9 százalékkal alacsonyabb víztartalmúak, tehát szerkezete lényegesen erősebb a többinél. A mellette ábrázolt szennyvíziszappal kezelt (Ss) esetén viszont, alacsonyabb víztartalom mellett kisebb a tixotróp hurok nagysága is, ez tehát mindenképpen gyengébb szerkezetű, a komposztal (C) javítottnál. (9. a, b. táblázat) Hasonló következtetésre jutottak Bastida és társai 2008. b.,

Albiach 2000. a talaj széntartalmát meghatározva, eredményeik alátámasztották, hogy a komposzttal kezelt terület jobb minőségű.

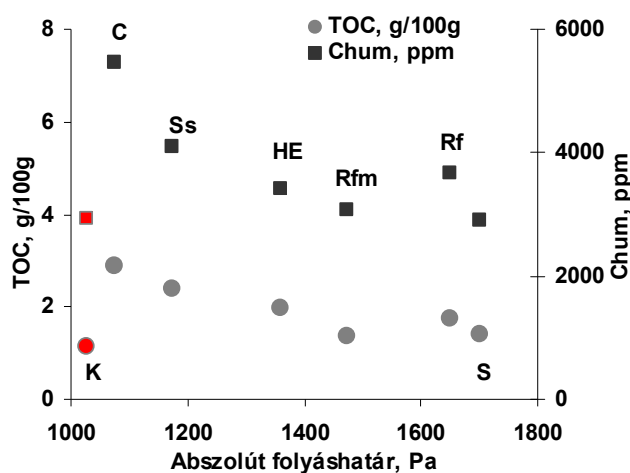
Ha a tixotróp hurok nagyságával jellemezzük az összehasonlítható állapotú szuszpenziók szerkezetét, nyírási-ellenállását a kontroll mintához képest mindegyik erősebb szerkezetet mutat. Az erdősítés hatása a legerőteljesebb, a magvak adagolásával kezelt mintából készült egyensúlyi üledék esetén szintén magas a tixotróp hurok nagysága, ennek a mintának nagyon rossz a vízmegtartóképessége, így valószínűleg a tömörödés okozza a magas tixotróp hurok értéket, tehát szerkezete egy év elteltével nem túl erős. Valamivel kisebb hatásfokú a komposzt adagolás és a szennyvíziszap adagolás, ezek módszerek rövid távon csak a vízmegtartó képességet javították lényegesen.

9. a, b. táblázat A Santomera katéna miniparcelláinak (Tres Caminos) 2004-2005 évi mintáiból készült talajszuszpenziók reológiai paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbéből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az $\Delta\tau_{thixo}$, Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plasztikus viszkozitás. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, a TOC, g/100g a teljes szerves széntartalom és OM, g/100g a TOC-ből számolt (1,72-szer TOC érték) szervesanyag-tartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	$\Delta\tau_{thixo}$,	τ_B ,	η_{pl} ,	OM,	TOC,	Chum,
2004. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	g/100g	g/100g	ppm
Tres Caminos-S	28,5 ± 0,3	1702 ± 129	5267 ± 211	13903 ± 1597	313 ± 58	20 ± 3	2,4 ± 0,2	1,4 ± 0,1	2892 ± 334
Tres caminos-K	28,7 ± 0,4	1028 ± 229	2614 ± 279	7746 ± 1261	240 ± 58	18 ± 4	2,0 ± 0,2	1,1 ± 0,1	2938 ± 571
Tres Caminos-Rfm	29,5 ± 0,7	1474 ± 513	3965 ± 279	16290 ± 1696	333 ± 27	21 ± 1	2,3 ± 0,1	1,4 ± 0,08	3061 ± 777
Tres Caminos-HE	29,9 ± 0,3	1360 ± 98	2650 ± 274	6846 ± 646	173 ± 57	13,5 ± 0,2	3,4 ± 0,4	2,0 ± 0,2	3407 ± 1056
Tres Caminos-Rf	30,9 ± 0,4	1650 ± 130	5536 ± 553	15250 ± 2158	575 ± 81	25 ± 4	3,0 ± 0,2	1,7 ± 0,1	3672 ± 288
Tres Caminos-Ss	36,3 ± 0,1	1174 ± 103	3569 ± 395	10022 ± 433	639 ± 95	22 ± 2	4,1 ± 0,05	2,4 ± 0,0	4106 ± 1043
Tres Caminos-C	37,3 ± 0,0	1076 ± 58	4207 ± 724	11587 ± 1536	1644 ± 1939	20 ± 3	4,9 ± 0,2	2,9 ± 0,1	5461 ± 34

Egyensúlyi üledékek	H ₂ O,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	$\Delta\tau_{thixo}$,	τ_B ,	η_{pl} ,	OM,	TOC,	Chum,
2005. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	g/100g	g/100g	ppm
Tres Caminos-Ss	37,8 ± 0,2	1034 ± 8	4552 ± 753	11710 ± 2799	991 ± 147	29 ± 7	4,6 ± 0,4	2,7 ± 0,2	4448 ± 1142
Tres Caminos-C	37,1 ± 0,2	1103 ± 114	2060 ± 235	6089 ± 1235	283 ± 15	14 ± 1	5,9 ± 0,3	3,5 ± 0,2	5145 ± 611
Tres Caminos-Rf	31,8 ± 0,4	2173 ± 39	5017 ± 545	13737 ± 1631	589 ± 98	27 ± 3	4,2 ± 0,2	2,4 ± 0,1	3538 ± 815
Tres Caminos-Rfm	31,0 ± 1,4	287 ± 15	238 ± 5	341 ± 57	9 ± 2	3,9 ± 0,7	2,9 ± 0,3	1,7 ± 0,2	2976 ± 628
Tres Caminos-S	29,1 ± 0,4	2086 ± 25	5924 ± 693	14940 ± 2198	525 ± 105	27 ± 7	3,1 ± 0,4	1,8 ± 0,2	3207 ± 705
Tres Caminos-HE	28,8 ± 0,9	606 ± 151	2624 ± 520	7570 ± 2322	272 ± 89	20 ± 2	4,0 ± 0,4	2,3 ± 0,2	4266 ± 788
Tres caminos- K	27,6 ± 0,2	1071 ± 20	863 ± 141	1820 ± 225	44 ± 15	10 ± 2	2,7 ± 0,4	1,5 ± 0,3	3281 ± 428

2005-ben változik a sorrend a 2004. évihez képest. Az Rfm minta a kontrollnál (K) is alacsonyabb tixotróp hurok értékkel (és egyéb reológiai paraméterekkel) rendelkezik, ami nem furcsa, hiszen a szuszpenzió által felvett víztartalom 1,5 százalékkal megnövekedett. Az Rf és az S jelzésű szuszpenziók értékei növekednek egy év elteltével. Ami várható volt, hiszen az újraerdősítés és a magvakkal való kezelés (mivel a növények kikelés után gyökereikkel erősítik a szerkezetet Tisdall és Oades 1979., 1997., Ghazala Nasim 2005., Ingelmo és társai 1998., Moreno-de las Heras 2009.) nyilvánvalóan, csak hosszú távon képesek teljes hatásukat kifejteni.



35. ábra A 2004-es tres caminosi talajminták teljes szerves széntartalmának (TOC), humuszanyagból származó széntartalmának (Chum) és az egyensúlyi üledékek abszolút folyáshatárának összevetése

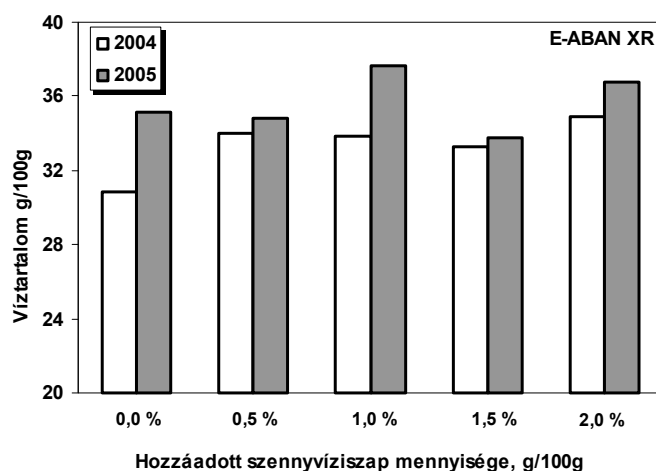
Összevettem az összehasonlítható állapotban lévő szuszpenziók abszolút folyáshatár értékeit a talajok szervesanyagtartalom értékeivel (35. ábra). A szervesanyagtartalom

növekedésével az abszolút folyáshatár értékének a csökkenését tapasztaltam. Ez az általános tapasztalataimtól eltérő eredmény, de mivel a talajminták igen nagy százaléka kavics, csak 54-86 százalékukat tudtam vizsgálni, és ugyan a kontroll mintához viszonyítva a vízmegtartóképesség növekedését és a szerkezet növekedő nyírási ellenállását tapasztaltam, e két paraméter alapján különböző sorrendet tudtam felállítani a minták közt. Valószínűsítem, ez az oka annak, hogy a szuszpenziók abszolút folyáshatára csökkenő tendenciát mutat a szervesanyag növekedésével.

4.5.5. Szennyvíziszap adagolás hatásának vizsgálata a spanyol Abanilla katéna mintáin

Az már a tres caminosi minták vizsgálatánál kiderült és korábbi publikációk is feltételezték (Albiach és társai 2000., 2001.), hogy megfelelő körülmények közt a szennyvíziszap-adagolás hatásosan javítja a talajszerkezetet (Bastida és társai 2007. c.), és ez a szuszpenziók javuló nyírási-ellenállási képességében is megnyilvánul. Az Abanilla hosszútávú kísérleti parcellákon, a külső szervesanyagbevitel hatására (0,5-2 g/100g-ra növelve a szervesanyagtartalmat) a növényi borítottságban különböző mértékű eltérés alakult ki. Egy kontroll területhez viszonyítva vizsgálták különböző szervesanyagtartalmú (különböző mértékű szilárd kommunális szemétből nyert) szervesfrakció adagolás hatásait. (Bastida és társai 2007. c.) E minták esetében nem készültek azonos koncentrációjú szuszpenziók, mivel egyensúlyi üledékeik víztartalma közt sincs nagy eltérés.

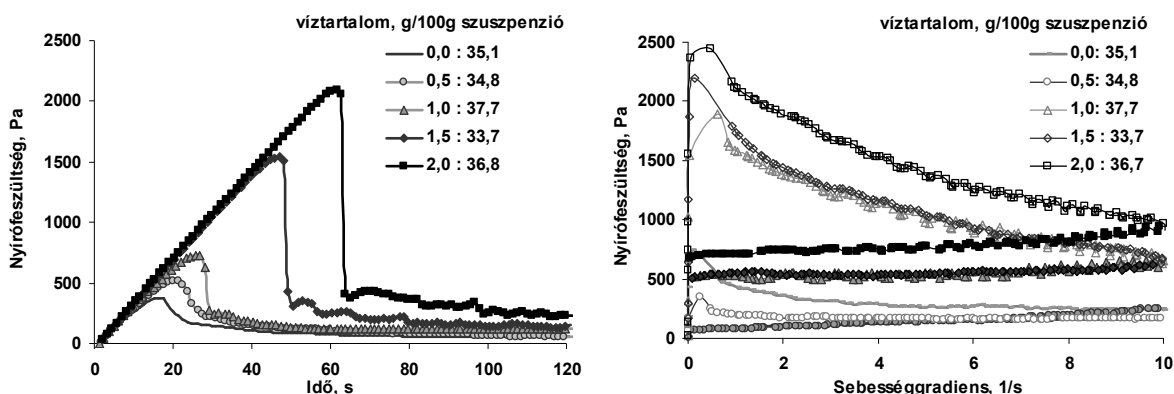
4.5.5.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján



36. ábra Abanilla hosszútávú kísérleti parcellákról származó 2004. (fehér oszlopok) és 2005. (szürke oszlopok) évi talajmintákból készült egyensúlyi üledékek víztartalmainak összevetése

A WCSSinCS értékeket figyelembe véve (36. ábra) elmondható, hogy bár kicsik a különbségek az egyes szuszpenziók közt, mindegyik talaj közepes vízmegtartóképességű, a kontroll mintánál mindegyik egyensúlyi üledék magasabb víztartalmú, tehát bizonyos mértékű javulás bekövetkezett a talajjavítási kísérletek során. Ezt Bastidáék által meghatározott vízmegtartóképesség értékek is alátámasztották (mely a kontroll mintára 398,2 g /1000g, a 0,5%-ra: 400,0 g/1000g, az 1,0%-ra: 421,4 g/1000g, az 1,5%-ra: 437,5 g/1000g a 2,0%-ra 440,8 g/1000g-nak bizonyult), valamint a növényi borítottság növekedésében is megnyilvánul, amint azt Bastida és társai 2007-es cikkükben közölték. (Bastida és társai 2007. c.)

4.5.5.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata



37. a, b. ábra 2005-ös abanillai talajmintákból készült összehasonlítható állapotú szuszpenziók nyírási-ellenállási (bal oldali) és folyásgörbéinek (jobb oldali) összevetése növekvő (felszálló ág, üres jelölő) majd csökkenő (leszálló ág, teli jelölő) sebességgradiens értékeknél (A görbék jelölői mellett, a szuszpenziók víztartalma látható 100 g szuszpenzióra vonatkoztatva. A szuszpenziók a talajminták 1 mm alatti frakciójából készültek és mérés előtt 24 órát álltak 25 °C-on.)

A folyásgörbék típusa jellemző a talajszuszpenziókra, a reológiai paraméterek párhuzamosan változnak egymással. (37. b. ábra) A görbék maximumait tekintve a szervesanyagtartalom növekedéssel egyenes arányú növekedés figyelhető meg. Egyetlen eltérést tapasztaltam ettől. A 0,5 százalékos szervesanyagtartalmú szuszpenzió a kontroll minta egyensúlyi üledékénél alacsonyabb maximummal rendelkezik, ami nem meglepő, mivel csak megfelelő Ca^{2+} -ion : szervesanyagtartalom arány esetén javul a talaj szerkezete. Korábbi tapasztalatok alapján (Michéli 2002., Bronic és Lal 2005., Majzik és társai 2007. b.) elmondható, hogy a szükségesnél kisebb mértékű szervesanyag hozzáadás a szerkezet gyengüléséhez vezet, ugyanúgy, mint a szervesanyagfelesleg.

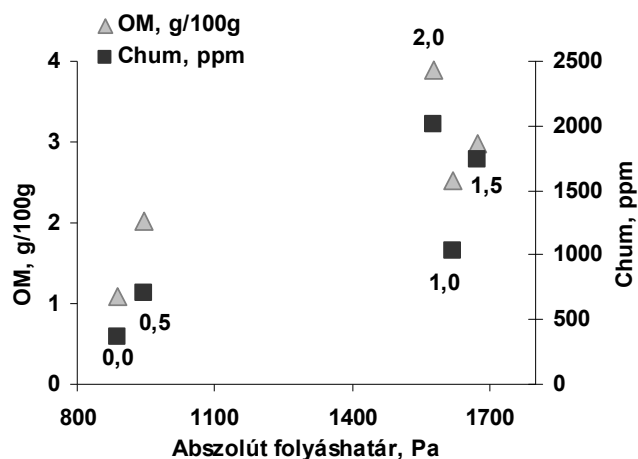
Amint az a 10. a, b. táblázatból látható, 2004-ben és 2005-ben is felcserélődést tapasztaltam a kontroll minta és a 0,5 g/100g szervesanyagtartalmú minta folyásgörbéiből számolt paramétereinek sorrendjében. A minta deformációra való érzékenységet leginkább kimutató tixotróp hurok nagysága egyenes arányban változik a szervesanyagtartalom növekedésével, természetesen, mivel a folyásgörbéből számolt összes paraméter párhuzamosan változik, itt is felcserélődtek 0,0 és 0,5 g/100g szervesanyagtartalmú szuszpenziók értékei.

10. a, b. táblázat Abanilla katéna 2004, 2005 évi mintáiból készült talajszuszpenziók paraméterei, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbékből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az A_{thixo} , Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plastikus viszkozitás. A Chum, ppm a humuszanyagok széntartalma, a TOC, g/100g a teljes szerves széntartalom és az OM, g/100g a TOC-ből számolt (1,72-szeres TOC érték) szervesanyagtartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	A_{thixo} ,	τ_B ,	η_{pl} ,	TOC,	OM,	Chum,
2004. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	g/100g	g/100g	ppm
Abanilla 2,0% OM	$34,9 \pm 0,2$	1579 ± 12	2932 ± 350	9062 ± 876	655 ± 72	20 ± 2	$2,3 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,3$	2013 ± 154
Abanilla 1,5% OM	$33,2 \pm 1,3$	1672 ± 29	2088 ± 65	6572 ± 438	428 ± 57	12 ± 3	$1,7 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,2$	1741 ± 130
Abanilla 1,0% OM	$33,8 \pm 0,3$	1618 ± 158	1912 ± 167	5627 ± 251	566 ± 71	9 ± 1	$1,5 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,3$	1039 ± 29
Abanilla 0,5% OM	$33,9 \pm 0,2$	946 ± 56	396 ± 33	211 ± 878	112 ± 11	27 ± 8	$1,2 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,1$	707 ± 42
Abanilla 0,0% OM	$30,8 \pm 0,3$	889 ± 36	792 ± 75	1461 ± 35	419 ± 583	19 ± 4	$0,6 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	366 ± 40

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	A_{thixo} ,	τ_B ,	η_{pl} ,	TOC,	OM,	Chum,
2005. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	g/100g	g/100g	ppm
Abanilla 2,0% OM	$36,8 \pm 0,5$	1802 ± 249	2474 ± 225	6861 ± 738	657 ± 114	12 ± 7	$2,1 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,4$	2045 ± 172
Abanilla 1,5% OM	$33,7 \pm 0,4$	1692 ± 131	2074 ± 291	6379 ± 375	524 ± 85	12 ± 6	$1,9 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,1$	1665 ± 74
Abanilla 1,0% OM	$37,7 \pm 0,1$	858 ± 109	5536 ± 576	1874 ± 123	560 ± 104	12 ± 2	$1,8 \pm 0,0$	$3,1 \pm 0,0$	1193 ± 219
Abanilla 0,0% OM	$35,1 \pm 0,2$	372 ± 14	732 ± 76	1746 ± 170	82 ± 21	14 ± 5	$0,9 \pm 0,0$	$1,6 \pm 0,0$	401 ± 17
Abanilla 0,5 % OM	$34,8 \pm 0,6$	501 ± 35	347 ± 6	360 ± 87	$68,1 \pm 0,5$	24 ± 7	$1,5 \pm 0,3$	$2,5 \pm 0,4$	1012 ± 169

Mivel a nyírási-ellenállási görbék mérési eredményeit kevésbé befolyásolja a deformációra érzékeny szerkezet, hiszen a mérési előkészítés és a mérés közt nem bolygatjuk meg a mintát, az abanillai szuszpenziók nyírási-ellenállási görbéinek maximum értékét hasonlítottam össze (38. ábra) a talajminták szervesanyagtartalmával.



38. ábra A 2004-es abanillai talajminták teljes szervesanyagtartalmának (OM), humuszanyagból származó széntartalmának (Chum) és az egyensúlyi üledékek abszolút folyáshatárának összevetése

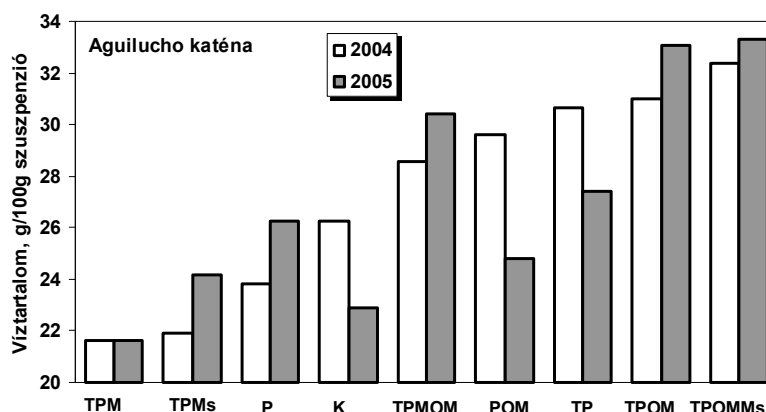
A 2004-es szuszpenziók abszolút folyáshatár értékei párhuzamosan változnak a talaj szervesanyagtartalmának növekedésével egészen 1,5 g/100g szervesanyagtartalomig. Aminek az lehet az oka, hogy túladagolták a szervesanyagot, és így az, megfelelő kalciumtartalom nélkül, csak a vízmegtartóképességet növeli meg, a szerkezetet gyengíti, a szuszpenzió elfolyósodását okozta.

4.5.6. El Aguilucho katéna, újraerdősítési remediációs kísérlet eredményei, teraszos művelés hatásának vizsgálata

Amint az már korábban az El Aguilucho katéna azonos koncentrációjú szuszpenzióinak mérési eredményeiből is kiderült, a teraszos művelés nem minden esetben eredményez a talajszerkezetben javulást. Ezt Bastida és munkatársai mikrobiológiai aktivitás mérései is megerősítik. (Bastida és társai 2007. b.) A fenyősítés (P: Pine), járulékos kezelésként: mikorrhizával való beoltás (M vagy m), szerves anyag (OM) bevitel, teraszos (T) (0.8 m széles, 70 m hosszú) művelés illetve ezek kombinációinak hatását mégis érdemes vizsgálni. A remediációs kísérletnél alkalmazott jelölések: K: kontroll minta, a P: fenyősítés, a POM: fenyővel borított és szervesanyaggal javított talaj, a TP: erdősített teraszos terület, a TPM: erdősített teraszos terület mikorrhizával javítva, a TPMs: erdősített teraszos terület mikorrhizával kezelt talajjal javítva, a TPOM: erdősített teraszos terület szervesanyaggal

javítva, a TPMOM: erdősített teraszos terület mikorrizával és szervesanyaggal javítva, a TPOMMs: erdősített teraszos terület szervesanyaggal és mikorrhizával kevert talajjal javítva.

4.5.6.1. Minősítés az összehasonlítható állapotban felvett víztartalom (WCSSinCS) értékek alapján



39. ábra Az El Aguilucho katénából származó 2004. (fehér oszlopok) és 2005. (szürke oszlopok) évi talajmintákból készült egyensúlyi üledékek víztartalmainak összevetése

Az összehasonlítható állapotban levő szuszpenziók víztartalmát (WCSSinCS) vizsgálva (39. ábra) hasonló következtetésre jutottam, mint amit az azonos koncentrációjú szuszpenziók eredményeit elemezve levontam. Három szuszpenzió kivételével (TP, TPOM, TPOMMs, melyek közepes minőségűek (2005-ben a TPMOM is feljavul ennyire), WCSSinCS értékük 30-40 g/100g közötti szuszpenzióra vonatkoztatva) az El Aguilucho katénából készült szuszpenziók a WCSSinCS értékek alapján rossz vízmegtartóképességűek, mivel kisebb a víztartalmuk 30 g/100g-nál a szuszpenzióra vonatkoztatva. A talajjavítás 2004. évi mintáira a WCSSinCS értékek alapján az alábbi egyértelműen javuló minőségi sorrend állítható fel:

TPm < TPMs < P < K < TPmOM < POM < TP < TPOM < TPOMMs.

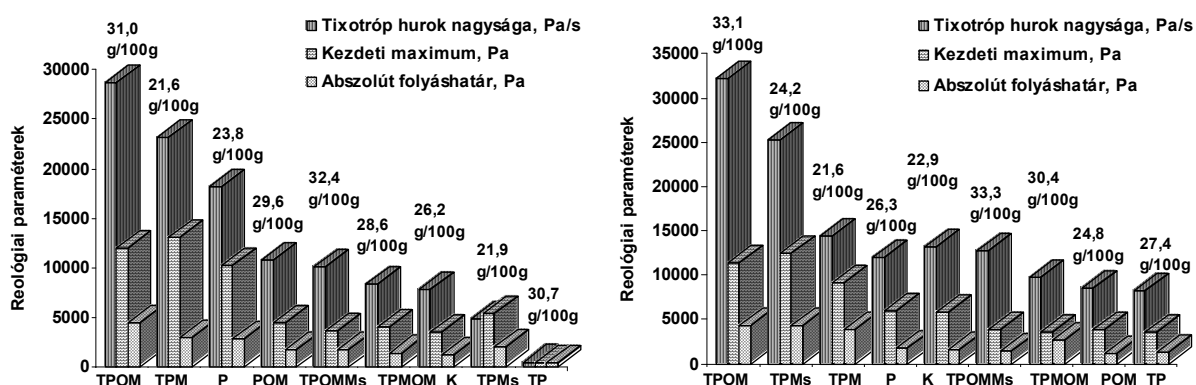
Ez a sorrend 2005-re jelentősen megváltozott, hiszen bizonyos kezelések késleltetve hatnak a talajszerkezetre:

TPm < K < TPMs < POM < P < TP < TPmOM < TPOM < TPOMMs.

Általánosságban elmondható, hogy a teraszosítás javítja a vízmegtartóképességet, amint azt Bastida és munkatársai is tapasztalták. (Bastida és társai 2007. b.)

4.5.6.2. 2004 és 2005-ös talajminták összehasonlítható állapotú szuszpenzióinak reológiai vizsgálata

Az El Aguilucho remediációs kísérlet 2004-es és 2005-ös mintáiból készített szuszpenziók nyírási-ellenállási és folyásgörbéiből számolt paramétereket összevettem a szuszpenziók víztartalmával. (40. a, b. ábra) Egyik évben sem tapasztaltam párhuzamot az általam meghatározott paraméterek közt. Ismét az történt, hogy túl sokféle talajjavítási módszert kellene összehasonlítani.



40. a, b. ábra Az El Aguilucho katéna 2004. (bal oldal) és 2005. (jobb oldal) évi talajmintáiból készült összehasonlítható állapotú szuszpenziók reológiai paramétereinek, a folyásgörbékből számolt kezdeti maximum (Pa) és a tixotróp hurok nagysága (Pa/s), valamint a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár (Pa) összehasonlítása Az oszlopok felett a szuszpenziók víztartalma (H₂O g/100 g) látható

A tixotróp hurok nagyságát figyelembe véve felállítható a 2004. évi mintákra egy sorrend:

TP < TPMs < K < TPmOM < TPOMMs < POM < P < TPm < TPOM

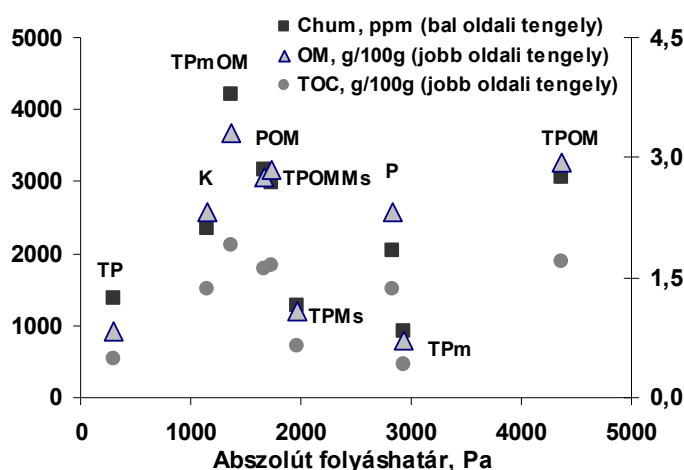
Tehát a rövid távú hatását figyelembe véve (TPOM, TPm, P, POM, TPOMMs, TPmOM) a teraszos újraerdősítés szervesanyag (TPOM) és mikorrhiza (TPm), illetve a kombinációk, egymásutáni alkalmazásuk, valamint az egyszerű újraerdősítési (P) folyamat, erősíti a szuszpenziók szerkezetét. Ha mikorrhizát tartalmazó talajt keverünk a javítandó talajhoz (TPMs), az rövidtávon szerkezetromboló hatású, ugyanúgy, mint a teraszos újraerdősítés (TP).

A 11. a, b. táblázatban és a 41. ábrán összevettem a 2004., 2005. évi összehasonlítható állapotú szuszpenziók reológiai paramétereit, adott víztartalom mellett, a talajminták szervesanyagtartalmával.

11. a, b. táblázat El Aguilco katéna 2004-2005. évi mintáiból készült talajszuszpenziók paramétereit, a H_2O , g/100g a szuszpenziók víztartalma, a τ_0 , Pa a nyírási-ellenállási görbéből számolt abszolút folyáshatár, a folyásgörbékből számolt paraméterek: a τ_{inimax} , Pa a kezdeti maximum, az $\Delta\tau_{thixo}$, Pa/s a tixotróp hurok nagysága, a τ_B , Pa a Bingham-féle folyáshatár, a η_{pl} , Pas a plaztikus viszkozitás. A Chum (ppm) a humuszanyagok széntartalma, a TOC (g/100g) a teljes szerves széntartalom és OM, g/100g a TOC-ből számolt (1,72-szer TOC érték) szervesanyagtartalom. (www.soil-index.com)

Egyensúlyi üledékek	H_2O ,	τ_0 ,	τ_{inimax} ,	$\Delta\tau_{thixo}$,	τ_B ,	η_{pl} ,	TOC,	OM,	Chum,
2004. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	g/100g	g/100g	ppm
El Aguilucho-K	$26,2 \pm 0,2$	1151 ± 105	3433 ± 91	7720 ± 1017	109 ± 47	13 ± 3	$1,3 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,3$	2345 ± 28
El Aguilucho-P	$23,8 \pm 0,0$	2826 ± 22	10230 ± 657	18221 ± 13438	511 ± 67	28 ± 3	$1,4 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,7$	2047 ± 201
El Aguilucho-POM	$29,6 \pm 0,1$	1660 ± 76	4400 ± 222	10801 ± 2331	239 ± 98	17 ± 4	$1,6 \pm 0,7$	$2,8 \pm 0,6$	3168 ± 116
El Aguilucho-TP	$30,7 \pm 0,4$	297 ± 16	395 ± 31	419 ± 56	22 ± 2	$8,0 \pm 0,4$	$0,5 \pm 0,3$	$0,8 \pm 0,5$	1373 ± 159
El Aguilucho-TPm	$21,6 \pm 0,1$	2939 ± 204	13039 ± 5592	23113 ± 11110	35 ± 11	17 ± 2	$0,4 \pm 0,03$	$0,7 \pm 0,05$	917 ± 30
El Aguilucho-TPMs	$21,9 \pm 0,3$	1961 ± 163	5350 ± 215	4768 ± 588	$23,4 \pm 0,8$	9 ± 1	$0,6 \pm 0,03$	$1,1 \pm 0,05$	1265 ± 133
El Aguilucho-TPOM	$31,0 \pm 0,5$	4373 ± 48	12007 ± 1310	28680 ± 4127	808 ± 192	27 ± 5	$1,7 \pm 0,2$	$2,9 \pm 0,3$	3057 ± 225
El Aguilucho-TPmOM	$28,6 \pm 0,1$	1369 ± 545	3948 ± 493	8346 ± 2185	124 ± 54	20 ± 2	$1,9 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,4$	4211 ± 211
El Aguilucho-TPOMMs	$32,4 \pm 0,0$	1737 ± 129	3569 ± 395	10022 ± 433	639 ± 95	22 ± 2	$1,7 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,6$	2987 ± 36

Egyensúlyi üledékek	H ₂ O _s	τ_0	τ_{inimax}	$\Delta\tau_{thixo}$	τ_B	η_{pl}	TOC _s	OM _s	Chum _s
2005. évi minták	g/100g	Pa	Pa	Pa/s	Pa	Pas	g/100g	g/100g	ppm
El Aguilucho-K	22,9 ± 0,2	1635 ± 27	5818 ± 744	13173 ± 627	237 ± 82	23 ± 3	1,1 ± 0,03	2,0 ± 0,04	2153 ± 17
El Aguilucho-P	26,3 ± 0,5	1772 ± 163	6021 ± 185	12020 ± 1090	140 ± 61	18 ± 3	1,0 ± 0,2	1,7 ± 0,3	2323 ± 110
El Aguilucho-POM	24,8 ± 0,2	1129 ± 45	3799 ± 400	8509 ± 267	143 ± 76	20 ± 4	1,2 ± 0,05	2,1 ± 0,1	2525 ± 220
El Aguilucho-TP	27,4 ± 0,2	1248 ± 188	3551 ± 154	8275 ± 492	222 ± 41	25 ± 3	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1136 ± 112
El Aguilucho-TPm	21,6 ± 0,0	3852 ± 346	9168 ± 2471	14386 ± 4967	69 ± 93	13 ± 8	0,6 ± 0,2	1,1 ± 0,4	1707 ± 98
El Aguilucho-TPMs	24,2 ± 0,0	4315 ± 322	12490 ± 1310	25333 ± 3935	281 ± 78	18 ± 8	0,7 ± 0,15	1,2 ± 0,3	1486 ± 74
El Aguilucho-TPOM	33,1 ± 1,0	4315 ± 119	11443 ± 1670	32143 ± 8010	605 ± 243	23 ± 2	2,0 ± 0,0	3,5 ± 0,0	3260 ± 280
El Aguilucho-TPmOM	30,4 ± 0,1	2583 ± 213	3526 ± 186	9767 ± 1996	1011 ± 277	30 ± 11	2,0 ± 0,0	3,5 ± 0,0	4019 ± 352
El Aguilucho-TPOMMs	33,3 ± 0,2	1448 ± 29	3856 ± 377	12760 ± 1081	792 ± 197	16 ± 4	1,8 ± 0,1	3,1 ± 0,1	3070 ± 338



41. ábra A 2004-es El Aguilucho remediációs kísérlet talajmintáinak teljes szerves széntartalma (TOC), a TOC-ből számolt szervesanyag tartalma (OM) és az extrahálható humuszanyag széntartalma (Chum) összehasonlítva az egyensúlyi szuszpenziók abszolút folyáshatáiraival (Pa)

A 41. ábra a 2004-es adatokon alapszik. Az ehhez tartozó víztartalmak alapján a már említett, a javuló minőség irányába felállított sorrend:

$$TPm < TPMs < P < K < TPmOM < POM < TP < TPOM < TPOMMs.$$

A reológiai paraméterek alapján felállított sorrend:

$$TP < TPMs < K < TPmOM < TPOMMs < POM < P < TPm < TPOM$$

a szervesanyagtartalmakat összevetve pedig az alábbiakra módosul:

$$TPm < TP < TPMs < K \leq P < POM \leq TPOMMs < TPOM < TPmOM$$

A három szempont együttes elemzése igen bonyolult feladat.

Ami bizonyos, hogy a kontroll mintánál (K) a vízmegtartóképesség, a reológiai paraméterek és a szervesanyagtartalom alapján is rosszabb minőségű a TPMs minta szuszpenziója. Az erdősített (P) minta kis vízmegtartóképességű, és ez az alacsony víztartalom okozza a magas reológiai paramétereket, nem a magas szervesanyagtartalom, bár a kontrollnál magasabb OM értéket mutat, így ennek a talajnak körülbelül ugyanolyan erős szerkezete, mint a kontroll mintának. A kombinált TPmOM, TPOM, TPOMMs, POM módszerek javítják a vízmegtartóképességet és a szervesanyagtartalom növekedésével a talajszerkezetet is erősítik.

2005-re az alábbiakra módosult az egyensúlyi üledékek víztartalma által felállítható sorrend:

$$TPm < K < TPMs < POM < P < TP < TPmOM < TPOM < TPOMMs.$$

A tixotróp hurok nagysága és a kezdeti maximum értéke alapján felállított sorrend pedig:

$$TP < POM < TPmOM < TPOMMs < K < P < TPm < TPMs < TPOM.$$

Hosszabb távon tehát a teraszos újraerdősítés szervesanyag adagolással, illetve talajba kevert mikorrhiza adagolással (TPOM, TPMs), továbbá az egyszerű újraerdősítés (P) bizonyult leginkább hatékonyak, ami növelte az időben kialakuló részecsketérháló erősségét, amire a kontroll mintánál magasabb vízmegtartóképesség mellett is a nagyobb tixotróp hurkokból és az ezzel párhuzamosan változó nagyobb kezdeti maximum értékekből lehetett következtetni. A TPm mintából készült szuszpenzió töménysége miatt rendelkezik magas reológiai paraméterekkel.

5. ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

Előkísérleteimben kidolgoztam a szélsőségesen eltérő ásványi és szemcseméret összetételű talajmintákból a reprodukálható reológiai mérésekre alkalmas, összehasonlítható állapotú vizes szuszpenziók készítésének és kezelésének (talajszemcsék homogenizálásának, az egyensúly kialakulásához szükséges állás idejének, a hőmérsékletnek és a szuszpenzióban megjelenő, zavaró harmadik fázis (légbuborékok) eltávolításának) módját. A talajminták <1 mm szitafrakcióinak vízzel való homogenizálását (üvegbottal és ultrahangozással) a mérés hőmérsékletén (25 ± 1 °C) kell elvégezni, így nem következik be részecskék méret szerinti szeparálódása; a légbuborékokat kocogtatással kell eltávolítani és a szuszpenziókat legalább 1 napon át ezen a hőmérsékleten kell tárolni.

Az összehasonlíthatóság kedvéért kezdetben azonos koncentrációjú szuszpenziókat akartam készíteni. Megállapítottam, hogy különféle talajokból azonos koncentrációjú szuszpenziók csak korlátozottan készíthetőek, hiszen a talajminták vízmegtartóképessége igen különböző. Az összes talajmintát így nem lehet összehasonlítani, csak bizonyos esetekben lehet néhány minta azonos koncentrációjú szuszpenzióját egymáshoz viszonyítani.

Meghatároztam a reológiai mérhető koncentráció tartományt, melynek végpontjai: a legkisebb víztartalom érték, amely éppen átnedvesíti a szemcséket (a festékiparban használatos vízszám értéke) és a legnagyobb, amelyet egyensúlyi üledékben még meg tud tartani a szemcsehálózat (egyszerű kémcsőkísérlettel meghatározható), mely nagyon eltérőnek bizonyult az egyes talajmintákra. Az egyensúlyi üledékek víztartalma (a szilárd és vizes fázis egyensúlyi aránya) a talaj szilárd fázisának határfelületi és kolloid állapotával egyértelműen változik, így a talajok szerkezetképzésére jellemző; a jelentősen különböző talajmintákból készült, de az egyensúlyi üledéknek megfelelő víztartalmú talajszuszpenziók összehasonlítható állapotban vannak. A talajszuszpenziók összehasonlítható állapotban meghatározott víztartalma (WCSSinCS: water content of soil suspensions in corresponding state), melyet a kémcsőkísérletek alapján, az alábbi egyenlet segítségével határoztam meg

$$\text{WCSSinCS} = 100 (V_{\text{sed}} - m_s f / \rho_s) / (V_{\text{sed}} - m_s f / \rho_s + m_s f)$$

ahol a víz sűrűségét $\rho_w \sim 1$ -nek vettem, a ρ_s , g/cm³ (mért érték) a talaj sűrűsége, az f faktor pedig a talajok eltérő nedvességtartalmát veszi figyelembe ($f = (100 - \text{nedvesség } \%) / 100$), korrelál az ismert talajminőséget jellemző vízmegtartóképességgel (water holding capacity - WHC), így a talajok minősítésre használható.

Annak a ténynek az alátámasztásául, hogy a WCSSinCS jellemzi a talajminőséget, meghatároztam néhány minta esetén a hazánkban használatos Arany-féle kötöttségi számot (K_A , $\text{cm}^3/100\text{g}$) a szokásosnál kisebb mennyiségekkel, hiszen kevés minta állt rendelkezésemre. Majd a kapott értékeket átszámoltam a MSZ-08 0205:1978 szabványban megszabott, 100 g mennyiségű talajmintára. Az így kapott értéket, az összehasonlítható állapotban a szuszpenziókra jellemző víztartalom értékekkel összevetve megállapítottam, hogy az általam vizsgált talajokra a meghatározott WCSSinCS értékek egyenes arányosan változnak a magyar talajtani gyakorlatban használatos Arany-féle kötöttségi (K_A) szám értékével. A WCSSinCS és a K_A értékek összevetéséből származó eredmények alátámasztják, hogy a WCSSinCS értékek alapján minősíthetjük a talajokat.

Mivel feltételeztem, hogy a talajszuszpenziók egyensúlyi üledékeinek rediszpergálhatósága jellemezni a talajok kötöttségét, hiszen minél kötöttebb a talaj, annál kevesebb vizet képes felvenni és annál nehezebben diszpergálhatók a szemcsék, kémcsőkísérlettel vizsgáltam az egyensúlyi üledékek tömörségére jellemző rediszpergálhatóságot. A mérések azonban azt bizonyították, hogy ez a módszer nem megfelelő sem a talajminták kötöttségének, sem szerkezeti erősségüknek jellemzésére, mivel az eredmények nem mutattak releváns különbséget és szisztematikus sorrendet.

Standardizáltam a talaj szuszpenziók reológiai méréseinek körülményeit. A viszkoplasztikus talajszuszpenziók folyásgörbéit az úgynevezett kis nyírás (low shear) tartományában kell mérni, mert a talajokat érő természetes (pl. lejtőn csúszás) és mesterséges (pl. művelés) nyíró hatások is feltehetően ebben a tartományban mozognak. Folyásgörbe és nyírási-ellenállási görbe mérésekből öt reológiai paramétert határoztam meg. A folyásgörbék közül meghatározható paraméterek közül a folyásgörbe kezdeti maximuma (τ_{inimax} , Pa) és a tixotróp hurok nagysága (Δt_{hixo} , Pa/s) az időben lassan kialakuló (tixotróp), egyensúlyi részecske térháló deformálhatóságára; a Bingham-féle egyenlet ($\tau = \tau_B + \eta_{pl}(d\gamma/dt)$) segítségével meghatározható extrapolált folyáshatár (τ_B , Pa) és a plasztikus viszkozitás (η_{pl} , Pas) viszont már a lenyírt szuszpenziókra jellemző. A talajszuszpenziók nyírási-ellenállási görbéiből meghatározott abszolút folyáshatár (τ_0 , Pa), mely a részecskék közti kötőerőket jellemző, a kötések elszakadásához szükséges nyírófeszültség, arányos a kohezív talajok ASTM Standard (D 2573-94) szerint mért nyírófeszültségével.

Reológiai mérések alapján jellemeztem Európa különböző területeiről (Magyarország, Németország, Olaszország, Spanyolország) származó talajok szuszpenzióinak szerkezeti

erősségét, nyírási ellenállását. A talajok két éven keresztül kerültek mintázásra. A mezőgazdaság hatásait modellező kísérleti területről, illetve talajjavítási kísérletekből származó talajmintákból készített összehasonlítható állapotban lévő szuszpenziók reológiai vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a folyás típusa viszkoplasztikus, néhány esettől eltekintve (olasz minták, melyek esetén tixotrópia és antitixotrópia kombinációja jelent meg) megfigyelhető a közepes adhéziójú részecsketérhálókra jellemző (nagy kezdeti maximum után lecsengő) tixotróp hurok. A mérések reprodukálhatósága mintától függően változik, a paraméterek átlagtól való eltérése néhány extrém rosszul mérhető minta kivételével, 1-33 százalék közötti. A reológiai paraméterek egymással párhuzamosan változnak, így elegendő egyféle paramétert megmérni. Javasolom az abszolút folyáshatár meghatározását, ami a talajok nyírással szembeni ellenállásával arányos és e paraméterrel releváns a terepi kohéziós erő mérés (ASTM Standard Test Method for Field Vane Shear Test), ami a talaj szerkezetét és annak erősségét jellemzi.

Kohéziómérővel, ami a talaj felső rétegének nyírással szembeni ellenállásának (kohéziójának) mérésére használható, 50*50 cm-es parcellákon (sima felület, vízzel telítve, megfelelő állási idő után) terepi méréseket végeztem (Pocket Vane Tester, Eijkelkamp, Agrisearch Equipment). A talajkohézió a talaj szerkezetét, annak erősségét jellemzi. A meghatározott számértékeket egy táblázat segítségével átszámoltam Pa-ra, majd összehasonlítottam az azonos hőmérsékleten és víztartalom mellett, a laboratóriumban az ugyanolyan összetételű szuszpenziókra meghatározott abszolút folyáshatár értékekkel. Az ugyanazon talajszuszpenziókra, azonos körülmények (azonos víztartalom, hőmérséklet, állási idő) között párhuzamosan végzett terepi kohéziómérés és laboratóriumi körülmények közötti abszolút folyáshatár meghatározás alapján megállapítottam, hogy a kohéziós erők jól korrelálnak az abszolút folyáshatár értékekkel. A terepi kohéziómérő alkalmas lehet adott területek szerkezeti stabilitásának időbeli monitorozására.

A talajszuszpenziók jellemző víztartalmainak és a reológiai paramétereinek összehasonlítása alapján arra következtettem, hogy általában minél nagyobb a szuszpenzió víztartalma, annál kisebb a szuszpenziók nyírással szembeni ellenállása, azaz annál folyékonyabbak, de az összes vizsgált talajminta szuszpenziójának reológiai eredményei érdemben nem összehasonlíthatók. Csak az azonos ásványi összetételű, a hasonló gazdálkodásnak vagy talajjavítási kísérletnek alávetett területekről származó szuszpenziók reológiai mérései adnak összehasonlítható eredményeket.

A nagyszámú talajminta sokféle paramétere között összefüggést keresve arra a következtetésre jutottam, hogy katénák, illetve remediációs kísérletek mintáin belül az általam

meghatározott víztartalom (WCSSinCS) és abszolút folyáshatár értékeket érdemes összehasonlítani az INDEX projekt adatbázisában (www.soil-index.com) lévő, a talajok szervesanyagtartalmát jellemző paraméterekkel (Chum, TOC, OM). Ennek alapján az alábbiak megállapításokat tettem. Az extrém művelési kísérlet (német, Puch) hatására a mintákban csökkenő szervesanyagtartalommal a talajok vízmegtartóképessége is csökken. Ezzel párhuzamosan a szerkezeti romlást nyilvánvalóan jelzi az abszolút folyáshatár értékeinek graduális csökkenése. A bio és a hagyományos gazdálkodási terület (olasz, Basilicata, Tuscany) mintái közül a hagyományos művelésből származók – valószínűleg a magas sótartalmuk miatt – lényegesen nagyobb vízmennyiség megtartására képesek, mint a bio gazdálkodásból származóak. A magas vízmegtartó képesség, magasabb TOC értékekkel, de gyengébb talajszerkezettel, a nagy víztartalmú szuszpenziók kisebb nyírási ellenállásával párosul. A növényi borítottság növekedése a spanyol Santomera katéna mintái esetén egyértelműen az erősödő talajszerkezetre utal, a növényzet a talaj megkötése mellett, hosszú távon növeli a szervesanyag mennyiségét is. A növényi borítottság növekedésének hatására a talajszuszpenziók nyírási ellenállása, a növekedő vízmegtartóképesség ellenére, nő. A spanyol tres caminos-i talajjavítási kísérlet sikerrel járt, ami a kontroll mintához viszonyított vízmegtartóképesség növekedésben, és a szerkezet növekvő nyírási ellenállásában is megnyilvánul, de ez a két változás nem egyirányba mutat. Más sorrend állítható fel a víztartalom növekedése és más a nyírási ellenállás növekedése alapján, ezért mutathat az előbbi mintázási helyekhez képest ellentétes változást (és egy harmadik, csökkenő sorrendet) az abszolút folyáshatár-szervesanyagtartalom görbe. A spanyol Abanilla területén folytatott hosszútávú szennyvíziszap-adagolós kísérlet talajszerkezet javító hatása a szervesanyagtartalommal növekedő abszolút folyáshatár értékben (és az ezzel párhuzamosan változó összes reológiai paraméter növekedő értékében) nyilvánul meg. Aminek oka, hogy a kihelyezett szervesanyagokból képződő humuszanyagok mennyiségüktől függően diszpergáló vagy aggregáló hatással bírnak. Amennyiben megfelelő mennyiségű szerkezetépítő kation van jelen, az aggregáló hatás mutatkozik meg. A talajösszetételi adatok (www.soil-index.com) alapján ezen talajok hozzáférhető karbonáttartalma 50% körüli ($15-30 \text{ meq Ca}^{2+}/100\text{g}$), ami a 1,5 százalékos szervesanyagtartalomhoz még elegendőnek, de a 2%-os szervesanyagtartalom esetén kevésnek bizonyult, így ez esetben megfigyelhető a hozzáférhető kalcium ionok mennyiségéhez viszonyítva túlzott szervesanyag mennyiség elfolyósító hatása is. A teraszos kísérletek (spanyol, El Aguilucho) eredményeiből arra következtettem, hogy a teraszos művelés önmagában nem javítja a talaj szerkezetét, még a vízmegtartóképesség sem javul minden esetben. Teraszos újraerdősítés és szervesanyag adagolás kombinációjával, illetve

teraszos újraerdősítést kombinálva a talajhoz kevert mikorrhiza adagolással (TPOM, TPMs) viszont jelentős javulás érhető el, ami hosszú távon nemcsak a vízmegtartóképesség növekedésben, de határozott abszolút folyáshatár növekedésben is megnyilvánul.

Összességében elmondható, hogy a reológiai módszer alkalmas a talajok szerkezeti degradációjának előrejelzésére. Adott mintasorozathoz, azonos talajféleség összehasonlítása esetén a káténát alkotó talajminták (melyek például azonos növénytakaróval, de különböző növényi borítottsággal rendelkeznek), a különbözőképpen művelt talajok, illetve a remediációs kísérletek (egy adott terület talajjavítási kísérlet) mintáinak reológiai paraméterei általában a szuszpenzió víztartalmának növekedésével csökkennek; a szerves-anyagtartalom növekedésével viszont csak akkor növekednek, ha a szerkezetépítő kationok (pl. Ca^{2+}) is hozzáférhetők, csak optimális szervesanyag-tartalom : Ca^{2+} arány esetén alakul ki nyírásnak ellenálló aggregált szerkezet. Gyakorlatban talajminősítésre egyszerűen alkalmazható a talajokra összehasonlítható állapotban jellemző víztartalom a WCSSinCS értéke, mely egyszerű kémcsőkísérlet alapján meghatározható. Ez által jellemezhető a talajok vízmegtartóképessége, és a növényeket vízzel való ellátásának mértéke. Így a talajdegradáció e nagyon egyszerű kísérlettel nyomon követhető. A talajdegradáció nyomonkövetésére javaslom a laboratóriumi körülmények között meghatározható, az azonos módon előkészített, azonos körülmények között tárolt és mért talajszuszpenziók nyírási ellenállására jellemző, abszolút folyáshatár értékének mérését, mivel a többi reológiai paraméterrel párhuzamosan változik. A terepi kohézió mérések alapján jellemezhető az adott nedvességtartalmú talaj szilárdsága, nyírási ellenállása, így a kohéziómérés alkalmas lehet adott területek szerkezeti stabilitásának időbeli monitorozására. A reológiai módszer egyértelműen alkalmas a degradálódott vagy szerkezet nélküli talajok szerkezetjavításának optimalizálására, így a jövőben javasoljuk a használatát a költséges szántóföldi kísérletek előtt.

6. SUMMARY

Rheological measurements can provide advanced quantitative parameters characteristic of soil structure in addition to the shear strength, which is measured by a simple technique based on torsion force measurement (ASTM Standard, D 2573-94) in soil mechanics. Previous investigations found rheology suitable for characterization of shear strength, the strength of physical network of concentrated suspensions (for example cement and clay suspensions), however, no articles are available about the characterization of the strength of soils physical network, and not even for the preparing of soil suspensions for this measuring method. The aim of this work was to develop the appropriate way of preparing soil suspension and the exact methodology for rheological characterization (flow curves and shear-time response curves) of soil suspension in corresponding state. Moreover, I wanted to develop methods to characterize soil quality for non-experts, and to compare the results determined by them with the rheological parameters to demonstrate that these simple methods are also adequate to characterize soil quality.

To make rheological measurement of soil suspensions (from soil samples with different mineral content, and particle size) reproducible, the preparing, holding and measuring methods (the suspensions homogenization method, the adequate standing time for develop of equilibrium sediments, the convenient temperature, and the method of eliminating air bubbles) were standardized. Soil fractions with the particle size under 1 mm were homogenized with distilled water, by glass rod and ultrasonication, at room temperature (25 ± 1 °C), which was also the temperature of measurement, air bubbles were eliminated by knocking, and the 1-day standing at room temperature was enough for soil suspensions to become to equilibrium.

There were tests about preparing suspensions with equal water content, in order to keep comparable suspensions. It was found that only limited number of soil suspensions can be prepared by equal concentration, as the water holding capacity of soils is very different. Consequently only several soil samples' suspension with equal water content can be compared. The soil suspensions have to be prepared in corresponding state. The concentration of suspensions is limited between the lowest (the so called: water number) and highest amounts of water content (the water content of equilibrium sediment formed spontaneously from dilute soil suspensions after long standing under gravitational pull determined by glass tube experiments, and calculated from the following equation:

$$\text{WCSSinCS} = 100 (V_{\text{sed}} - m_s f / \rho_s) / (V_{\text{sed}} - m_s f / \rho_s + m_s f)$$

, where WCSSinCS is given in unit g/100g, V_{sed} , cm^3 is the volume of the formed sediment, m_s , g is the mass of soil fraction, if the density of water ρ_w is ~ 1 and that of solid ρ_s is usually $2.6\text{--}2.65 \text{ g cm}^{-3}$ (in case of large amount of organic matter content it can decrease to $\sim 2.5 \text{ g cm}^{-3}$), and $f = (100 - \text{humidity } \%) / 100$), over which solid particles are wetted and homogeneously distributed in space, and is different from sample to sample. The water content has inherent relation to the density of particle network (i.e., the number of binding points in unit volume). The lower the WCSSinCS, the denser the suspension and so the stronger the particle network, i.e., the shear tolerance, or in other words the resistance against shear is higher in more concentrate suspensions; moreover this water content is proportional to the water holding capacity (WHC) of soils. As accepted widely, the better soils have higher WHC; however, the higher water content liquefies suspensions. Consequently the quality of soils can be characterized by the water content of measured suspensions (WCSSinCS).

For supporting the state, that WCSSinCS, which correlates well with the soils water holding capacity, is characteristic for soil quality, the plasticity index according to Arany (K_A , $\text{cm}^3/100\text{g}$) was determined using smaller amount of soil than usual. 15 g soil was milled in a mortar, and distilled water was poured into this until a homogeneous plastic paste was formed. After this the distilled water was added dropwise till the upper limit of plasticity was realized by the so called thread proof. The determined value was count over 100 g amount of the soil sample (MSZ-08 0205:1978), and was compared with the value of WCSSinCS. It can be stated, that the WCSSinCS values change parallel with the plasticity index according to Arany (K_A). The result of the comparison of WCSSinCS and K_A values verifies the state, that the soil quality can be qualified by WCSSinCS. Comparing the water content of soil suspensions in corresponding state (WCSSinCS) and the rheological parameters, it can be stated that, usually the higher the water content the lower the shear strength of the soil suspensions, and the higher their flow ability. But the result of all soil suspensions can not be compared. Only the results of suspensions with the same mineral content, from plots under similar management or remediation process are comparable.

The compactness of equilibrium sediments was characterized by this simple glass tube experiment, by the study of redispersing, because it was suspected that the redispersing of equilibrium sediments is characteristic for the density of soils, as the more compact the soil, the less water it can hold, and the less dispersible the particles are. It is stated by these measurements, that this method is neither appropriate to feature soil compaction, nor their

strength. The results did not show any relevant differences between the samples and not even a systematic order.

The circumstances of the rheological measurement of soil suspensions were standardized. Flow curves of viscoplastic soil suspensions have to be measured at low shear range, as the natural and artificial effects on soils (agriculture, slipping on a slope, deformation) also are in this range. The initial maximum (τ_{inimax} , Pa), the maximum of flow curves can be determined and the thixotropic loop area (Δ_{thixo} , Pa/s) can be calculated by RheoWin Data Manager. The extrapolated yield value (τ_B , Pa) and the plastic viscosity (η_{pl} , Pas), which are characteristic for soil suspensions structure after shear, were calculated from the downward curves, over the plastic flow range according to the Bingham model ($\tau = \tau_B + \eta_{\text{pl}} (d\gamma/dt)$). The maxima of shear-time response curves, the absolute yield value (which is the characteristic force for breaking of bonds between soil particles) correlates with the shear strength determined according to the ASTM Standard D 2573-94. It was stated from rheological measurements of equilibrium sediments of soils (9 sampling sites such as catenae, remediation experiments in Europe, sampled through 2 years), that the type of flow is viscoplastic, and high initial maximum and significant thixotropy was experienced in almost all cases, which are characteristic of loose aggregates with medium adhesion. The reproducibility of measurements was different from sample to sample, in almost all cases changed between 1-33 percentages. Another appointment is, that rheological parameters change parallel with each other, it is enough to measure one of them. The determination of absolute yield value is recommended; because it correlates well with the parameter characteristic of soil strength determined according ASTM Standard Test Method for Field Vane Shear Test.

Parallel field investigations by Pocket Vane Tester (Eijkelkamp, Agrisearch Equipment), which equipment is able to measure the cohesion value, kgcm^{-2} , and is able to characterize the shear tolerance of the upper layer of soil, under identical circumstances for the same suspensions (prepared and stored under the same conditions, applied the same homogenization method, the adequate standing time and the convenient temperature for develop of equilibrium sediments) and laboratory measurements of the absolute yield value were taken. It was stated that cohesion force values and absolute yield values correlate well. The pocket vane tester is appropriate for monitoring the strength of soils in field, and their structural stability in time.

By investigation of the large amount of parameters of several soil samples, it was inferred, that for samples of catenae and remediation researches it is worth to compare the WCSSinCS values and the absolute yield values with the parameters characteristic of the organic matter content of soils, namely the Chum, TOC, OM values, which are available in the data base of INDEX project (www.soil-index.com). From these comparisons several states were made. The effect of mismanagement (German Puch samples) manifests in parallel decreasing of organic matter content and water holding capacity of the soils. The structural degradation also can be followed by gradual decreasing of absolute yield values. Regarding the bio and conventional agricultural plots (the Italian Basilicata, Tuscany samples) it can be stated, that the samples of conventional agriculture – supposedly, because of their high salt content – are able to hold relevant higher water content as the samples of bio agriculture. The high water holding capacity couples with higher TOC values but weaker soil structure, and the suspensions with higher water content have also lower shear resistance. The increase of plant cover in case of the samples of Spanish Santomera catena made the soil structure definite stronger, because besides plants soil binding effect, they have a long-term effect of increase the organic matter content of soil. The increase of plant cover affects the increase of soil suspensions shear resistance, despite of their increasing water holding capacity. The Spanish remediation experiments in Tres Caminos proved to be successful, they manifested themselves in the increase of water holding capacity compared to control sample, the shear resistance also increased, but two effects did not show the same trend. Two different orders can be shown by grading the samples by increasing WCSSinCS or by increase in their shear resist; probably it is the cause of the third decreasing trend of absolute yield value-organic matter content curve. In case of long-term experiments of adding sewage-sludge on the Spanish Abanilla plots, the amelioration of soil structure manifests itself in the increase of absolute yield value (proportional with the other rheological parameters) by increasing organic matter content. Humic substances can have aggregating or dispersing effect depending on the amount of available cementing cation content. Regarding the soil composition data (www.soil-index.com) these soils have approximately 50 percentage carbonate ($15\text{--}30 \text{ meq Ca}^{2+}/100\text{g}$) content, which is enough for the 1,5 percentage organic matter content to solidify the soil structure, while in case of 2 percentage of organic matter content, the liquefying effect came out for lack of Ca^{2+} ions. It can be stated from terrace experiments of Spanish El Aguilucho catena, that the terracing cultivation in its own does not remediate the soil structure, in several cases not even the water holding capacity increases. However in case of combination of terracing with reforestation and with adding of organic

matter, or terracing reforestation combined with adding of mycorrhiza mixed in soil (TPOM, TPMs) significant amelioration can be obtained, which manifest not only in increase of water holding capacity after long time, but in distinct increase of absolute yield value.

As a conclusion it can be stated, that rheology is an appropriate method to indicate the structural degradation of soils in time. Usually, in case of the same sort of soils, for example samples of a catena (with the same vegetation, but different plant cover), samples under different degree of cultivation, or under remediation experiments, the rheological parameters decrease with the increase of the suspensions water content; the increase of organic matter content can effect higher shear resistant aggregate structure when adequate Ca^{2+} -ion is available and the rate of organic matter content and Ca^{2+} -ion content is also sufficient. In practise the value of WCSSinCS, the water content of suspensions in corresponding state, by which the water holding capacity and its ability to provide water for plants can be characterized, can be determined from simple glass tube experiments, and by this simple method the soil degradation can be followed.

Rheology is advised to use before expensive field investigations. In laboratory the determination of absolute yield values of soil suspensions (prepared, held and measured under standardized conditions), which are characteristic for the shear tolerance of soil suspensions, and change parallel with the other rheological parameters, is recommended. In field by cohesion measurements with pocket vane tester the soil strength and shear tolerance (by known water content) can be characterized. This method can be used for monitoring structural stability of soils.

REFERENCES

- Akagi J., Zsolnay Á. 2007. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: Air-drying and pre-incubation *Chemosphere* 69. 1040–1046.
- Akagi J., Zsolnay Á. 2008, Effects of long-term de-vegetation on the quantity and quality of water extractable organic matter (WEOM): Biogeochemical implications, *Chemosphere* 72., 1462–1466.
- Albiach R., Canet R., Pomares F., Ingelmo F. 2000., Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil, *Bioresource Technology* 75., 43±48.
- Albiach, R., Canet R., Pomares F., Ingelmo F. 2001. a., Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years, *Bioresource Technology*, Volume 77., Issue 2., April 2001., Pages 109-114.
- Albiach, R., Canet R., Pomares F., Ingelmo F. 2001. b., Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil *Bioresource Technology*, Volume 76., Issue 2., January 2001., Pages 125-129.
- ASTM Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil, D 2573-94.
- Babarczy J., Sárosi E. 1952., Szőlőtalajok kötöttségének vizsgálata farionográffal. *Agrokémia és Talajtan* Tom. I. No. 4. 511-522.
- Bachmann J., Guggenberger G., Baumgartl T., Ellerbrock R.H., Urbanek E., Goebel M.O., Kaiser K., Horn R., Fischer W.R., 2007., Review Article, Physical carbon-sequestration mechanisms under special consideration of soil wettability, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170., 14–26.
- Barnes H. A., Hutton J.F., Walters K., 1989., *An Introduction of Rheology*, Rheology Series 3., Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Barnes H.A. 1997, Thixotropy, a review, *J, Non-Newtonian Fluid Mech.*, 70., 1-33.
- Barnes H. A., Nguyen Q.D., 2001., Rotating vane rheometry - a review, *J, Non-Newtonian Fluid Mech*, 98., 1–14.
- Barnes H.A. 1999., The yield stress - a review or 'panta roi' - everything flows?, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 81., 133–178.
- Barré P., McKenzie B.M., Hallett P.D. March 2009., Earthworms bring compacted and loose soil to a similar mechanical state, *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 41., Issue 3., P. 656-658.

Bastida F., Moreno J. L., Hernandez T., Garcia C. 2006., Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation, *Soil Biology & Biochemistry* 38., 2503–2507.

Bastida F., Moreno J. L., Hernández T., García C., 2007. a., Microbial activity in non-gricultural degraded soils exposed to semiarid climate *Science of the Total Environment* 378., 183–186.

Bastida F., Moreno J. L., Hernandez T., Garcia C. 2007. b., The long-term effects of the management of a forest soil on its carbon content, microbial biomass and activity under a semi-arid climate, *Applied Soil Ecology*, Volume 37., Issues 1-2., October 2007., Pages 53-62.

Bastida F., Moreno J. L., Garcia C. Hernandez T., 2007. c., Addition of Urban Waste to Semiarid Degraded Soil: Long-term Effect, *Pedosphere*, Volume 17., Issue 5., October 2007., Pages 557-567.

Bastida F., Barberá G.G., García C., Hernández T. 2008. a., Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions, *Applied soil ecology* 38. 62-70.

F. Bastida, E. Kandeler, J.L. Moreno, M. Ros, C. García, T. Hernández 2008. b., Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate, *Applied Soil Ecology*, Volume 40., Issue 2., October 2008., Pages 318-329.

Bongiovanni M.D., Lobartini J.C., 2006., Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation, *Geoderma*, 136., 660-665.

Böhm P., Gerold G., 1995., Pedo-hydrological and sediment responses to simulated rainfall on soils of the Konya Uplands (Turkey), *Catena* 25., 63-76.

Brady, Nyle C, Weil, Ray R, 1999., 1996. The nature and Properties of soils, twelfth edition, Prentice-Hall, Inc, New Jersey

Bronic J.C., Lal R., 2005., Soil structure and management: a review, *Geoderma* 124., 3-22.

Buzás István, 1993., Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1, A talaj fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani vizsgálata, INDA 4231 kiadó, Budapest.

Caravaca F., Masciandaro G., Ceccanti B., 2002., Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment, *Soil and Tillage Research*, Volume 68., Issue 1., October 2002., Pages 23-30.

Carter, M,R., 2004., Researching structural complexity in agricultural soils, *Soil & Tillage Research* 79, 1-6.

Ceccanti B., Doni S., Macci C., Cercignani G., Masciandaro G., 2008., Characterization of stable humic–enzyme complexes of different soil ecosystems through analytical isoelectric focussing technique (IEF), *Soil Biology & Biochemistry* 40., 2174–2177.

Czibulya, Zs., Tombácz, E., Szegi, T., Michéli E, and Zsolnay Á, 2008., Rheology of soil suspensions in corresponding state Geoderma beküldve

Czibulya Zs., Tombácz E., Szegi T., Michéli E., and Zsolnay Á., 2009., Rheology as a new tool indicating structural changes in Soil Catenae, European Journal of Soil Science, beküldésre előkészítve

de la Rosa D., Diaz-Pereira E., Mayol F., Czyz E.A., Dexter A.R., Dumitru E., Enache R., Fleige H., Horn R., Rajkay K., Simota C., 2005., SIDASS project Part 2. Soil erosion as a function of soil type and agricultural management in a Sevilla olive area, southern Spain, Soil & Tillage Research 82. 19–28.

Dzuy, N, Q., Boger, D, V., 1983., Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions, J, Rheology, 27.,4., 321-349.

Filep Gy., 1988., Talajkémia, Akadémiai Kiadó, Budapest.

Ghazala Nasim Caderno de Pesquisa Sér, Bio., Santa Cruz do Sul, 2005., jan./jun v, 17., n, 1, p, 119-136., ISSN: 1677-5600.

Ghezzehei, T,A., Or, D., 2001., Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses, Soil Sci, Soc, Am, J, 65., 624–637.

Ghezzehei, T,A., Or, D., 2003., Pore-Space Dynamics in a Soil Aggregate Bed under a Static External Load, Soil Sci, Soc, Am, J, 67., 12-19.

Golchin A., Clarke P., Baldock J.A., Higashi T., Skjemstad J.O., Oades J.M., 1997., The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter in a volcanic ash soil as shown by ¹³C NMR spectroscopy. I. Whole soil and humic acid fraction Geoderma 76. 155-174.

Hamza M.A., Anderson W.K. 2005., Soil compaction in cropping systems, A review of the nature, causes and possible solutions Review, Soil & Tillage Research 82. 121–145.

Hernández T., Masciandaro G., Moreno J.I., García C. 2006., Changes in organic matter composition during composting of two digested sewage sludges, Waste Management 26. 1370–1376.

Hirth J,R., Mckenzie B,M, and Tisdall J,M, 1997., Do the roots of perennial ryegrass elongate to biopores filled with the casts of endogeic earthworms? Soil Biol. Biochem, Vol. 29., no, 3-4., pp. 529-531.

Horn R., Smucker A. 2005., Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils Soil & Tillage Research 82. 5–14.

Horn R., Vossbrink J., Peth S., Becker S. 2007., Impact of modern forest vehicles on soil physical properties, Forest Ecology and Management, Volume 248., Issues 1-2., 30. August 2007., Pages 56-63.

<http://soils.usda.gov/sqi/concepts/glossary.html>

Hunter R.J. 1989., Foundation of Colloid Science, Volume II. 997., Claredon, Press, Oxford

Ingelmo F., Canet R., Ibañez M. A., Pomares F., García J. 1998., Use of MSW compost, dried sewage sludge and other wastes as partial substitutes for peat and soil, Bioresource Technology, Volume 63, Issue 2, February 1998., Pages 123-129.

Johnston, C.T., E, Tombácz, 2002., Surface Chemistry of Soil Minerals, Ch.2., In: Soil mineralogy with environmental applications (J.B, Dixon and D.G, Schulze, Eds,) Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pp. 37-67.

Kaiser K., Guggenberger G., 2000., The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils, Organic Geochemistry 31., 711±725.

Karlen D, L., Ditzlerb C, A., Andrews S, S, 2003., Soil quality: why and how?, Geoderma 114., 145– 156.

Keveiné B.I., 1998., Talajföldrajz, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest

Kocsis I., Ligetvári F., Daróczy S., 1996.: A valiográf-fal mért reológiai paraméterek felhasználása a talajvédelemben. „A termőföld védelme” az OMÉK '96 Kísérő rendezvénye. Gödöllő. p.: 104-111.

Kocsis I., Ligetvári F., Babák Gy., Simándi P. 1999.: Talajreológiai mérések valiográf-fal. Magyar Spektrokémiai Vándorgyűlés kiadványa. Veszprém. p.: 255-258.

Lapen D. R., Topp G. C., Edwards M. E., Gregorich E. G., Curnoe W. E., 2004., Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration–water content relationships in tillage research, Soil & Tillage Research, 79., 51-62.

Leij F.J., Ghezzehei, T.A., Or, D 2002., Analytical Models for Soil Pore-Size Distribution After Tillage Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 66. 1104–1114.

Lipiec, J., Hatano, R., 2003., Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth, Geoderma 116., 107-136.

Lipiec J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A., Nosalewicz A., September 2006., Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods, Soil and Tillage Research, Volume 89., Issue 2., Pages 210-220.

Lipiec J., Wójciga A., Horn R., April 2009., Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction, Soil and Tillage Research, Volume 103., Issue 1., Pages 170-177.

Majzik, A., Tombácz, E., 2007. a., Interaction between humic acid and montmorillonite in the presence of calcium ions I, Interfacial and aqueous phase equilibria: Adsorption and complexation Organic Geochemistry 38., 1319–1329.

Majzik, A., Tombácz, E., 2007. b., Interaction between humic acid and montmorillonite in the presence of calcium ions II, Colloidal interactions: Charge state, dispersing and/or aggregation of particles in suspension, Organic Geochemistry 38., 1330-1340.

Makádi M., Tomócsik A., Márton Á. 2006., Szerves és szervetlen anyagok mezőgazdasági hasznosíthatóságának vizsgálata a DE ATC Kutató Központban. MTA SZ-SZ-B. megyei Közgyűlés és XV. Tudományos Ülés, Nyíregyháza, Szeptember 22. CD-ROM.

Marinari S., Masciandaro G., Ceccanti B., Grego S., 2000., Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties, *Bioresource Technology*, Volume 72., Issue 1., March 2000., Pages 9-17.

Markgraf, W., Horn, R., Peth, S., 2006., An approach to rheometry in soil mechanics—Structural changes in bentonite, clayey and silty soils review article, *Soil and Tillage Research*, Volume 91., Issues 1-2. 1-14.

Markgraf W., Horn R. 2008. a., Rheologische Untersuchungen in der Bodenmikromechanik: Klassifikation mikrostrukturellen Verhaltens anhand des Verlustfaktors $\tan \delta$ Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG). Online Publikation: <http://www.dbges.de/wb//pages/publikationen/berichte-der-dbg.php>.

Markgraf, W.; Horn, R. 2008. b., Rheologie: Mikrostrukturelle (De)stabilisierung in Böden unter Einfluss von Salz- und Wassergehalt - Klassifikation von Festigkeitsverlust auf der Mikroskala. Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG). Online Publikation: <http://www.dbges.de/wb//pages/publikationen/berichte-der-dbg.php>.

Masciandaro G., Macci C., Doni S., Maserti B. E., Leo, A. C-B., Ceccanti, B., Wellington E., 2008., Comparison of extraction methods for recovery of extracellular β -glucosidase in two different forest soils, *Soil Biology & Biochemistry* 40., 2156–2161.

Mezger T. G., 2002., *The Rheology-Handbook*, Vincent Verlag.

Michael A., Schmidt J., Enke W., Deutschländer Th., and Malitz G., 2005., Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss—results of comparative model simulations, *Catena* 61., p. 155–164.

Michéli E., Tombácz E., Szegi T., Gál A. 2002.: The relationship of rheological parameters and erodibility of soils. *Proceeding of the 12th ISCO Conference, Beijing, China.* p.: 110-115.

Moreno-de las Heras M., Merino-Martín L., Nicolau J. M., 2009., Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate, *Catena* 77. 39-47.

Mózes-Vámos 1968., *Reológia és reometria*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest

MSZ-08 0205:1978., Arany- féle kötöttségi szám (KA)

Neaman A., Singer A., 2004., The effects of palygorskite on chemical and physico-chemical properties of soils: a review, *Geoderma* 123., 297–303.

Oades J. M., 1990., Associations of Colloids in Soil Aggregates, *Soil Colloids and their Associations in Aggregates*, Chapter 17., P. 463-483., New York.

Or D., Ghezzehei T. A., 2002., Modelling post-tillage soil structural dynamics: a review, *Soil & Tillage Research* 64., 41-59.

Papiernik S. K., Lindstrom M. J., Schumacher T. E., Schumacher J. A., Malo D. D., Lobb D. A., April 2007., Characterization of soil profiles in a landscape affected by long-term tillage, *Soil & Tillage Research* Volume 93., Issue 2., Pages 335-345.

Pascual J., Garcia C., Hernandez T., Moreno J. L., Ros M., 2000., Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes *Soil Biology & Biochemistry* 32. 1877±1883.

Rosquoët F., Alexis A., Khelidj A., Phelipot A., 2003., Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation, *Cement and Concrete Research* 33., 713–722.

Schoenholtz S.H., Miegroet H., Van Burger J. A., 2000., A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities, *Forest Ecology and Management* 138., 335-356.

Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K., 2004., A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Soil & Tillage Research*, 79., p. 7-31.

Stefanovits P., 1975., Talajtan, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.

Steffe J. F. 1996., *Rheological Methods in Food Process Engineering*, Second edition, Freeman Press, USA, ISBN: 0-9632036-1-4.

Sultan N., Delage P., Cui Y. J., 2002., Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay, *Engineering Geology* 64., 135–145.

Szántó F., 1986., *A kolloidkémia alapjai*, Budapest

Szegi T., Tombácz E., Czibulya Zs., Akagi J., Zsolnay A., 2006., Quantitative rheological indicators for soil physical degradation, *Agrokémia és Talajtan* 55., 69–78.

Szegi T., Czibulya Zs., Makádi M., Szeder B., 2008., Szerves-szervetlen adalékanyagok hatása a nyírségi homoktalajok talajszerkezeti, nedvességgazdálkodási tulajdonságaira és a terméseredményekre, *Talajvédelem különszám, Talajtani vándorgyűlés, Nyíregyháza, 2008. május 28-29.*, Talajvédelmi A. Bessenyei Gy. Könyvkiadó, p. 163-168.

Tarchitzky J., Chen Y., 2002., Rheology of Sodium-montmorillonite suspensions: Effects of humic substances and pH, *Soil Sci, Soc, Am, J*, 66., 406-412.

Tisdall J. M., Oades J. M., 1979., Stabilization of soil aggregates by the root segments of ryegrass, *Australian Journal of Soil research*, 17. 429-441.

Tisdall J. M., Smith S. E and. Rengasamy P 1997., Aggregation of soil by fungal hyphae. *Australian Journal of Soil Research* 35. p.: 55-60.

Tombácz E., 1999., Colloidal properties of humic acids and spontaneous changes of their colloidal state under variable solution conditions, *Soil Science*, 164., 814-824.

Tombácz Etelka, 2002., A humuszanyagok határfelületi és kolloid tulajdonságai, *Magyar Kémiai Folyóirat*, 108. (10), 435-443.

Tombácz Etelka 2002., Humuszanyagok a környezeti rendszerekben, *Magyar Kémikusok Lapja*, 57. (8), 306-313.

Tombácz E., Gilde M., Szántó F., 1984., The effects of Na-salicylate and Na-fulvate on the stability and rheological properties of Na-montmorillonite suspensions, *Acta Physica et Chemica* 30., 165–174.

Tombácz E., Balázs J., Lakatos J., Szántó F., 1989., Influence of the exchangeable cations on stability and rheological properties of montmorillonite suspensions, *Colloid and Polymer Science* 267., 1016-1025.

Tombácz E., Lámfalusi E., Szekeres M., Micheli E. 1996., Humuszanyagok hatása a talajok felületi tulajdonságaira, *Agrokémia és Talajtan*, 45., 238-248.

Tombácz E., Szekeres M., Baranyi L. and Micheli E. 1998., Surface modification of clay minerals by organic polyions, *Colloids and Surfaces A*., 141., 379-384.

Tombácz E., Csanaky Cs., Illés E., 2001., Polydisperse fractal aggregate formation in clay and iron oxide suspensions, pH and ionic strength dependence, *Colloid and Polymer Sci*, 279., 484-492.

Tombácz E. 2002., Adsorption from Electrolyte Solutions, Ch.12. In: *Adsorption: Theory, Modeling, and Analysis* (Ed. J. Tóth), Marcel Dekker, New York, pp. 711-742.

Tombácz E. 2003., Talajreleváns határfelületi és kolloid kölcsönhatások, *MTA Doktori Értekezés*, Szeged.

Tombácz E., Libor Zs., Illés E., Majzik A., Klumpp E., 2004., The role of reactive surface sites and complexation by humic acids in the interaction of clay mineral and iron oxide particles, *Organic Geochemistry*, 35., 257-267.

Tombácz E., Szekeres M., 2004., Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes, *Applied Clay Science* 27., 75-94.

Tombácz E., Szekeres M., 2006., Surface charge heterogeneity of kaolinite in aqueous suspension in comparison with montmorillonite, *Applied Clay Science*, 34., 105-124.

Tomócsik A., Makádi M., Bogdányi Zs., Márton Á. 2006., Kommunális szennyvíziszap komposzt mezőgazdasági felhasználásának vizsgálata. *Biohulladék*, 1. évf. 4. szám, pp. 16-20.

Zsolnay A. 2003., Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions, *Geoderma* 113., 187– 209.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki Dr. Dékány Imre Professzor Úrnak, hogy a Kolloidkémiai Tanszéken lehetővé tette számomra disszertációm elkészítését.

Köszönetet szeretnék mondani közvetlen témavezetőmnek, Dr. Tombácz Etelka egyetemi tanárnak, aki szakmai és személyes támogatásával mindvégig segített.

Köszönöm családomnak, hogy disszertációm elkészítése során végtelen türelmükkel mindvégig mellettem álltak.

Végül köszönetemet fejezem ki a Kolloidkémiai Tanszék minden munkatársának szakmai segítségéért és barátságáért.